



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DE EDIFICIOS DE FORJADOS DE HORMIGÓN “IN SITU” MEDIANTE EL USO DE ELEMENTOS DE CONTROL DE CARGA EN LAS CIMBRAS

TESIS DOCTORAL

Autor

Manuel Buitrago Moreno

Directores

Dr. Jose M. Adam Martínez

Dr. Pedro A. Calderón García

Dr. Yezid A. Alvarado Vargas

Valencia, junio de 2018

*Si he visto más lejos es porque estoy
sentado sobre los hombros de gigantes*
(Isaac Newton, 1676)

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, me gustaría mostrar mi más profundo agradecimiento a mis directos de tesis: Jose M. Adam, Pedro A. Calderón y Yezid A. Alvarado. A Jose por su apoyo incondicional desde el primer día, su preocupación constante por mi formación y el cuidado y trato especial recibido. A Pedro por ser la magnífica persona que es, por sus magníficas aportaciones y por ofrecerme la oportunidad de trabajar al más alto nivel. A Yezid por trabajar codo con codo en muchos momentos, a pesar de los 8.286km que nos separan, permitirme acercarme a su elevado nivel de conocimiento en la temática y tratarme como un compañero y un amigo más. A todos ellos por creer en mí y formar un vínculo de amistad mucho más allá de la relación director-doctorando tan necesario, a mi parecer, en la larga relación que debe mantenerse en un proyecto de investigación a largo plazo. Trabajar así, día a día, es un placer y uno de los principales motivos por los que decidí iniciar la aventura de realizar una tesis doctoral en este grupo de personas.

Mención especial merece también Juan J. Moragues, sin el que el desarrollo de esta tesis doctoral no hubiera sido tan extenso, tan productivo y tan completo en cuanto a la demostración de la viabilidad del uso de limitadores de carga en puntales. Su aportación ha sido siempre relevante y destacada.

Me gustaría acordarme también de otros compañeros del grupo como Paula, Benjamín y Jose con los que tantos momentos divertidos he compartido, y con los que siempre he podido contar y tener la oportunidad de discutir planteamientos y resultados de la investigación. Asimismo con mis más recientes compañeros: Ignazio y Elisa. También extender mi agradecimiento a Isa y a otros compañeros de la Unidad de Edificación del Departamento de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería Civil: Teresa, Nacho, César, Rut y Alejandro.

No me puedo olvidar de mis compañeros y amigos del ICITECH que estuvieron apoyándome incondicionalmente todos y cada uno de los días de laboratorio. A Debora por su apoyo, su energía positiva e infinita. A Dani por tener todos los temas eléctricos y electrónicos siempre bajo control, incluso en los momentos más tensos. Y a Jose Manuel por prestar su ayuda incondicional e incansable en la preparación y realización del ensayo experimental.

También me gustaría agradecer a otras personas que me apoyaron en momentos puntuales: Fernando, con el que compartí espacios en el laboratorio con distancias de separación entre ensayos ridículas (menores a 1cm) sin tener problemas, Pascual, Juan Franqueza, Lola, Natalia, Lino, Juan Monzó, Rosa y Javier.

La sala de investigadores del ICITECH no hubiera sido lo mismo sin Vicent, Tatiana, Aitor, Marta, Lucía, Vicente, Alberto, Antonio, Alba o Lourdes; con los que he compartido muchos momentos y comidas en el instituto.

En la estancia realizada en la University of Surrey (Guildford-UK) también tuve la suerte de encontrarme con personas de muy alto nivel y con gran humildad. A mi tutor de la estancia Juan Sagasetta le agradezco su magnífica recepción, los momentos de café, las largas reuniones técnicas realizadas, y permitirme aprender y realizar de una forma muy rigurosa nuevos estudios que nunca antes había realizado. Aquí también habría que añadir a Nsikak Ulaeto cuyo apoyo incondicional en el aprendizaje de LS-DYNA y en el cálculo en dinámico fue imprescindible, y su amistad es actualmente invaluable; así como al Dr. P. Olmati por proporcionarnos parte del modelo numérico sobre el que estuvimos trabajando durante meses. Tuve también la suerte de compartir muchos momentos inolvidables con otros compañeros de la universidad que actualmente considero mis amigos: Esu, Ming, Ying, Rajesh, Andrea y Lucía. A los dos últimos, y a Anna, debo agradecerles además los días de rutas y visitas compartidos durante los fines de semana de la estancia, así como las diferentes visitas técnicas realizadas donde pudimos compartir puntos de vista arquitectónicos e ingenieriles. Me gustaría agradecer también el magnífico trato recibido por parte de la familia con la que vivía: Mimi, Marc, Ollie, Anna, Ben y Matt.

Quisiera extender mi gratitud a diferentes instituciones públicas. A la Universidad de Alicante y las personas involucradas que nos permitieron llevar a cabo determinados ensayos que no podíamos realizar en las instalaciones del ICITECH. Al Ministerio de Educación, Ciencia y Deporte por la financiación recibida para mi contrato FPU [FPU13/02466] y por cubrir los gastos de mi estancia en Guildford (UK). A la Generalitat Valenciana por la subvención recibida bajo el marco de proyectos para grupos de investigación emergentes [GV/2015/063].

Cómo no, mi gratitud también va dirigida a diferentes empresas privadas que apostaron incondicionalmente por el desarrollo del proyecto como fueron Levantina, Ingeniería y Construcción S.L. y Encofrados J. Alsina S.A. Sin la participación de ambas empresas no hubiera sido posible la ejecución del ensayo experimental llevado a cabo para demostrar la viabilidad del uso de limitadores de carga en puntales.

De manera intencionada he dejado para el final a mi familia cuyo apoyo incondicional, fuera cual fuera mi decisión, siempre ha sido imprescindible para conseguir todo lo realizado. A mis padres por confiar ciegamente en mí fuera cual fuera la situación y a mi hermano por pensar que no hay nada que no pueda realizar. En este sentido, también expresar mi más sentido agradecimiento hacia mis amigos que siempre me dijeron que podría hacer lo que me propusiera: Carlos, Dani, Fran, José Luis, Miquel y Pablo.

Y especial mención debe recibir Marina, a la que tanto tiempo he robado y que siempre ha considerado que no hay nada que no pueda conseguir. Siempre he sentido su apoyo, su comprensión y su cariño, sin los que la realización de esta tesis doctoral no podría haberse llevado a cabo. A ella le debo mucho, y espero saber cómo recompensarle en esta vida cuyo camino compartimos juntos.

ÍNDICE GENERAL

1. CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	39
1.1. Introducción.....	39
1.2. Objetivos.....	41
1.3. Contenido.....	42
2. CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE	45
2.1. Introducción.....	45
2.2. Sistemas de apuntalamiento y procesos constructivos de estructuras de edificios	46
2.2.1. Apuntalamiento en un proceso de cimbrado / descimbrado (CD).....	48
2.2.2. Apuntalamiento en un proceso de cimbrado / clareado / descimbrado (CCD).....	49
2.2.3. Apuntalamiento en un proceso de cimbrado / recimbrado / descimbrado (CRD).....	50
2.2.4. Operaciones en los diferentes procesos constructivos.....	51
2.3. Cálculo de procesos constructivos de estructuras de edificios	52
2.3.1. La importancia de conocer la magnitud y la distribución de las cargas existentes durante la construcción de estructuras de edificios	53
2.3.2. Métodos de cálculo para estimar la transmisión de carga entre forjados y puntales durante la construcción de estructuras de edificios de hormigón armado	58
2.3.3. Estudios experimentales	60
2.3.4. Estudios numéricos.....	64
2.3.4.1. Transmisión de cargas sin considerar la temperatura, la retracción o la fluencia.....	65
2.3.4.2. Efecto de la retracción y la fluencia en la transmisión de cargas	67
2.3.4.3. Efecto de la temperatura en la transmisión de cargas.....	67
2.4. Antecedentes al limitador de carga en puntales en la literatura	68
2.4.1. Limitación de la carga de los puntales (ALPHI EP2511449A1).....	68
2.4.2. Rápido descimbrado de puntales (Alsina ES2294874A1 y ULMA ES2366967T3).....	69

2.5. Conclusiones relativas al estado del arte.....	70
3. CAPÍTULO 3. ESTUDIO DE LA VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE LOS LIMITADORES DE CARGA MEDIANTE SIMULACIÓN NUMÉRICA	73
3.1. Introducción	73
3.2. Estudio de la viabilidad técnica de los limitadores de carga aplicado a un edificio experimental.....	75
3.2.1. Descripción del edificio considerado para el estudio	75
3.2.2. Modelo de elementos finitos.....	76
3.2.3. Análisis paramétrico y resultados	77
3.3. Estudio de la viabilidad técnico-económica de los limitadores de carga aplicado al caso de un edificio real	82
3.3.1. Descripción del edificio real considerado para el estudio	82
3.3.2. Modelo de elementos finitos.....	82
3.3.3. Resultados.....	85
3.3.4. Análisis económico.....	89
3.4. Conclusiones	90
4. CAPÍTULO 4. DISEÑO, FABRICACIÓN, ENSAYO Y SIMULACIÓN DE LIMITADORES DE CARGA	93
4.1. Introducción	93
4.2. Diseño	95
4.2.1. Diseño conceptual.....	95
4.2.2. Diseño de detalle	99
4.2.2.1. Primera aproximación	99
4.2.2.2. Segunda aproximación	105
4.2.2.3. Tercera aproximación	107
4.2.2.4. Solución final. Accesorios, DOE y elección de prototipos	108
4.3. Fabricación.....	116
4.4. Ensayo.....	120
4.4.1. Lote 01. Ensayos monotónicos y caracterización del acero	120

4.4.1.1. Ensayos	120
4.4.1.2. Caracterización del acero.....	128
4.4.1.3. Estudio de sensibilidad del diámetro del albergue del pasador	130
4.4.2. Lote 02. Ensayos sobre el diseño definitivo	131
4.4.2.1. Ensayos de limitadores de carga de forma aislada	133
4.4.2.2. Ensayos de limitadores de carga instalados en puntales.....	137
4.4.2.3. Caracterización del acero.....	138
4.5. Simulación	139
4.5.1. Calibración de los modelos numéricos.....	139
4.5.2. Definición simplificada del comportamiento de los limitadores de carga para modelos macro-escala	140
4.6. Conclusiones.....	141
5. CAPÍTULO 5. USO DE LOS LIMITADORES DE CARGA DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DE UN EDIFICIO EXPERIMENTAL	145
5.1. Introducción.....	145
5.2. Definición del ensayo experimental	145
5.2.1. Objetivos	145
5.2.2. Diseño del ensayo.....	146
5.2.2.1. Aspectos generales. Diseño geométrico.....	146
5.2.2.2. Materiales	146
5.2.2.3. Acciones y coeficientes de seguridad en fase de construcción y en servicio	147
5.2.2.4. Cálculos estructurales en servicio para el dimensionamiento de la losa	147
5.2.2.5. Seguridad y salud.....	147
5.2.3. Modelo de elementos finitos	148
5.2.4. Fabricación y ensayo previo de limitadores de carga.....	150
5.2.5. Monitorización del ensayo	151
5.3. Preparación y descripción del ensayo.....	152
5.3.1. Instalación de la monitorización.....	152
5.3.2. Descripción del ensayo.....	155
5.3.2.1. Preparación de la estructura y del sistema de apuntalamiento	155

5.3.2.2. Realización del ensayo	157
5.3.2.3. Demolición de la losa y envío a vertedero	160
5.4. Resultados	160
5.4.1. Transmisión de cargas entre el forjado y los puntales	161
5.4.2. Cargas en puntales	162
5.4.2.1. Influencia de la temperatura. Compensación.....	162
5.4.2.2. Cargas en puntales.....	164
5.4.2.3. Momentos en puntales.....	165
5.4.3. Flechas en forjados	166
5.4.4. Curvas fuerza-desplazamiento de los puntales	168
5.4.5. Evolución de la temperatura del hormigón en la losa y en las probetas cilíndricas.....	170
5.4.6. Evolución de las propiedades mecánicas del hormigón en el tiempo.	173
5.4.7. Descimbrado	175
5.5. Conclusiones	178
 6. CAPÍTULO 6. ESTIMACIÓN DE LAS MEJORAS INTRODUCIDAS POR EL USO DE LIMITADORES DE CARGA DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURAS DE EDIFICIOS	 181
6.1. Introducción	181
6.2. Calibración y comprobación del modelo numérico del ensayo experimental.....	181
6.2.1. Calibración del modelo numérico.....	181
6.2.2. Comprobación del modelo numérico.....	186
6.3. Efecto positivo del limitador de carga en el ensayo.....	188
6.3.1. Cargas medias y cargas máximas	188
6.3.2. Cargas en cada puntal	189
6.3.3. Desplazamiento en las posiciones donde aparece una pértiga instalada en el ensayo	190
6.4. Efecto positivo del limitador de carga durante el descimbrado	192
6.4.1. Comprobación del modelo numérico durante el descimbrado	193

6.4.2. Comparación de la fase de descimbrado con y sin limitadores de carga según las mismas condiciones del ensayo	194
6.4.3. Comparación de la fase de descimbrado con y sin limitadores de carga considerando puntales de igual rigidez.....	196
6.4.3.1. Limitadores de carga utilizados en el ensayo	197
6.4.3.2. Limitadores de carga con la misma carga límite y superior máximo desplazamiento plástico permitido.....	198
6.5. Efecto positivo del limitador de carga frente al colapso progresivo de las estructuras de edificios durante su construcción	199
6.5.1. Breve introducción	199
6.5.2. Resumen del estudio realizado previamente	201
6.5.2.1. Descripción de la estructura del edificio considerado para el estudio....	201
6.5.2.2. Descripción del modelo de elementos finitos	203
6.5.2.3. Escenarios de fallo local y resultados.....	204
6.5.3. Aplicación de los limitadores de carga en los escenarios de fallo con graves consecuencias.....	206
6.5.3.1. Análisis del tercer escenario de fallo sin y con la aplicación de limitadores de carga en puntales	207
6.5.3.2. Análisis del cuarto escenario de fallo sin y con la aplicación de limitadores de carga en puntales	215
6.6. Conclusiones.....	223
7. CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES, APORTACIÓN ORIGINAL Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	227
7.1 Resumen y conclusiones.....	227
7.2. Aportación original.....	232
7.3. Futuras líneas de investigación.....	233
7. CHAPTER 7. CONCLUSIONS, NOVELTY AND FUTURE LINES OF RESEARCH	235
7.1 Summary and conclusions	235
7.2. Novelty	239
7.3. Future lines of research.....	240
REFERENCIAS	243

APÉNDICE 1. ENSAYO EXPERIMENTAL 255

A1.1. Introducción	255
A1.2. Planos	255
A1.3. Preparación del ensayo.....	263
A1.3.1. Preparación de cables y conexiones para galgas, captadores y termopares	263
A1.3.2. Preparación de las pértigas con los captadores de desplazamiento .	263
A1.3.3. Pegado de galgas extensométricas en los puntales	264
A1.3.4. Preparación de los termopares	267
A1.4. Cargas en puntales.....	268
A1.5. Momentos en puntales.....	280
A1.5.1. Cálculo a partir de la deformación de tres puntos.....	280
A1.5.2. Resultados.....	283
A1.6. Flechas en forjados.....	302
A1.7. Curvas fuerza-desplazamiento de puntales	307
A1.8. Secuencias descimbrado y cargas en puntales	312

APÉNDICE 2. SIMULACIÓN NUMÉRICA..... 325

A2.1. Introducción	325
A2.2. Comprobación del modelo numérico	325
A2.2.1. Cargas en puntales	326
A2.2.2. Desplazamiento en pértigas	332
A2.3. Resultados del estudio del efecto positivo del limitador de carga en el ensayo.....	336
A2.3.1. Cargas en puntales	337
A2.3.2. Desplazamiento en pértigas	343
A2.4. Resultados del estudio del efecto positivo del limitador de carga durante el descimbrado	347
A2.4.1. Comprobación del modelo numérico durante el descimbrado.....	348
A2.4.2. Comparación de la fase de descimbrado con y sin limitadores de carga según las mismas condiciones del ensayo	355

A2.4.3. Comparación de la fase de descimbrado con y sin limitadores de carga considerando puntales de igual rigidez.....	361
--	-----

APÉNDICE 3. PUBLICACIONES DEL AUTOR RELACIONADAS CON LA TESIS	367
--	------------

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1.1. Esquema del sistema de apuntalamiento y detalle de un puntal.....	39
Fig. 2.1. Puntal telescópico regulable de acero con rosca visible o rosca cubierta [15].	47
Fig. 2.2. Sistema para la ejecución de forjados de losa maciza (izquierda) y para la ejecución de forjados reticulares (derecha) [16].	47
Fig. 2.3. Sistema de mesas [16]......	48
Fig. 2.4. Ejemplo de edificio en construcción con un proceso constructivo CD.....	49
Fig. 2.5. Ejemplo de edificio en construcción con un proceso constructivo CCD (izquierda) y detalle de colocación de sopandas principales y sopandas secundarias (derecha).	49
Fig. 2.6. Ejemplo de una planta de un edificio en construcción con un proceso constructivo CRD.	50
Fig. 2.7. Operaciones de cada uno de los procesos constructivos para el caso de dos plantas consecutivas apuntaladas hasta el hormigonado del tercer nivel.	51
Fig. 2.8. Pandeo de puntales durante la construcción de un edificio (I) [20].	53
Fig. 2.9. Pandeo de puntales durante la construcción de un edificio (II).	54
Fig. 2.10. Colapso de una planta debido al fallo de un puntal [12].	54
Fig. 2.11. Fisuras y flechas excesivas tras el descimbrado [12].	55
Fig. 2.12. Distribución regional de las investigaciones sobre la transmisión de cargas entre forjados y puntales durante la construcción de estructuras de edificios. Año de la primera publicación recopilada: 1952.	57
Fig. 2.13. Número acumulado de artículos publicados en revistas indexadas de alto impacto.	58
Fig. 2.14. Control de la carga límite propuesto por ALPHI (Patente EP2511449A1) mediante: (a) pandeo de los elementos verticales y (b) rotura del manguito.	69

Fig. 2.15. Elementos para descarga repentina de puntales durante el descimbrado:
(a) Alsina (Patente ES2294874A1) y b) ULMA (Patente ES2366967T3)..... 70

Fig. 3.1. Ventajas del uso de limitadores de carga en puntales. 74

Fig. 3.2. Vista en 3D del edificio..... 75

Fig. 3.3. Pasos de carga correspondientes a las diferentes operaciones constructivas
(I). 77

Fig. 3.4. Pasos de carga correspondientes a las diferentes operaciones constructivas
(II). 77

Fig. 3.5. Isolíneas de cargas en puntales. Sin limitadores de carga (izquierda) y con
limitadores de 20.0kN (derecha)..... 79

Fig. 3.6. Isolíneas de cargas en puntales. Con limitadores de carga de 18.0kN
(izquierda) y de 16.0kN (derecha). 80

Fig. 3.7. Isolíneas de cargas en puntales con limitadores de carga de 14.0kN. 80

Fig. 3.8. Incremento de la carga que recibe el forjado 1 y la máxima flecha en función
de la reducción de la carga máxima en puntales debido a la carga límite de los
limitadores de carga 81

Fig. 3.9. Porcentaje de limitadores de carga con comportamiento plástico respecto al
número total de puntales de la planta clareada. 81

Fig. 3.10. Fotografía de la fase constructiva del edificio de la facultad de Bellas
Artes. 82

Fig. 3.11. Pasos de carga correspondientes a las diferentes operaciones constructivas
(I). 83

Fig. 3.12. Pasos de carga correspondientes a las diferentes operaciones constructivas
(II). 83

Fig. 3.13. Pasos de carga correspondientes a las diferentes operaciones constructivas
(III). 84

Fig. 3.14. Acciones permanentes características. Isolíneas de carga en puntales sin
limitadores de carga 85

Fig. 3.15. Acciones permanentes características. Isolíneas de carga en puntales con limitadores de carga de 15.0kN.	86
Fig. 3.16. Acciones permanentes características. Isolíneas de carga en puntales con limitadores de carga de 12.0kN.	86
Fig. 3.17. Acciones permanentes más sobrecargas. Isolíneas de carga en puntales sin limitadores de carga.	87
Fig. 3.18. Acciones permanentes más sobrecargas Isolíneas de carga en puntales con limitadores de carga de 15.0kN.	87
Fig. 3.19. Acciones permanentes más sobrecargas Isolíneas de carga en puntales con limitadores de carga de 12.0kN.	88
Fig. 3.20. Evolución de la carga recibida (izquierda) y de las máximas flechas (derecha) del primer forjado.	89
Fig. 4.1. Partes de un puntal (izquierda) y detalle de la zona de fijación del puntal telescópico (derecha).	94
Fig. 4.2. Comportamiento teórico de los puntales con limitadores de carga instalados (en negro) y sin limitadores de carga (en azul).	95
Fig. 4.3. Boceto de la ubicación del limitador de carga en el puntal: alternativa mediante el anclado en la rosca (izquierda) y alternativa sobre la campana (derecha).	97
Fig. 4.4. Boceto del sistema estructural tipo pórtico y su materialización en uno de los elementos que forman el limitador de carga.	97
Fig. 4.5. Boceto de medio elemento del limitador de carga sin albergue para el pasador.	98
Fig. 4.6. Boceto de un elemento del limitador de carga con 3 secciones débiles.	98
Fig. 4.7. Primera aproximación al diseño de limitadores de carga.	100
Fig. 4.8. Conjunto formado por pasador-limitador-campana: (a) vista en planta y (b) vista 3D.	100
Fig. 4.9. SOLID186 [107].	101

Fig. 4.10. Comportamiento tenso-deformacional del acero utilizado para los limitadores. 101

Fig. 4.11. Cuarto de modelo considerado. 102

Fig. 4.12. Contactos: pasador-limitador (izquierda) y limitador-campana (derecha). 103

Fig. 4.13. Zona de la campana donde se impiden los desplazamientos verticales. 103

Fig. 4.14. Primeros resultados. Tensiones de tracción, representadas en rojo, y de compresión, en azul. 104

Fig. 4.15. Curvas de comportamiento Carga-Desplazamiento para el análisis de la influencia del rozamiento entre limitador (primera aproximación) y campana.... 105

Fig. 4.16. Solución con tirante en el limitador. 106

Fig. 4.17. Curvas de comportamiento Carga-Desplazamiento para el análisis de la influencia del rozamiento entre limitador (segunda aproximación) y campana. .. 106

Fig. 4.18. Limitador de carga (tercera aproximación) con geometría circular: 1/4 de modelo (izquierda) y geometría completa (derecha). 107

Fig. 4.19. De izquierda a derecha: Solución con tirante adecuado a la nueva geometría circular (alternativa 1), con paredes verticales (alternativa 2) y con embutición en la campana (alternativa 3). 107

Fig. 4.20. Boceto del albergue del pasador según la solución arriba del limitador (izquierda) o embebido en el limitador (derecha). 108

Fig. 4.21. Boceto del detalle de solución para colocación simultánea del par de elementos de los limitadores de carga. 109

Fig. 4.22. Solución definitiva sobre la que se aplica el DOE con el detalle del albergue del pasador embebido en el limitador: solución con tirante (arriba) y con paredes verticales (abajo). 109

Fig. 4.23. Efecto de cada uno de los factores e interacciones sobre la carga límite en el caso de limitadores con tirante. 114

Fig. 4.24. Efecto cuantitativo de cada uno de los factores sobre la carga límite en el caso de limitadores con tirante.	114
Fig. 4.25. Curvas de diseño para la solución de limitadores con tirante de 3mm de espesor.	114
Fig. 4.26. Efecto de cada uno de los factores e interacciones sobre la carga límite en el caso de limitadores con paredes verticales.	115
Fig. 4.27. Efecto cuantitativo de cada uno de los factores sobre la carga límite en el caso de limitadores con paredes verticales.	115
Fig. 4.28. Curvas de diseño para la solución de limitadores con paredes verticales y 2mm de altura.	116
Fig. 4.29. Pulido y preparación de las superficies de los lingotes de acero.	117
Fig. 4.30. Control numérico y posicionamiento de los lingotes.	117
Fig. 4.31. Mecanizado (izquierda) y resultado final (derecha).....	117
Fig. 4.32. Separación (izquierda) y adecuación de la altura (derecha) de los limitadores de carga.....	118
Fig. 4.33. Campana modificada para la solución con paredes verticales (izquierda) y limitador de carga posicionado en un puntal (derecha).....	118
Fig. 4.34. Marcaje del posicionamiento del hueco (izquierda) y taladro para iniciar la materialización del hueco.	118
Fig. 4.35. Materialización completa del hueco en la solución del limitador con tirante.....	119
Fig. 4.36. Máquina para el chorro de aire y arena (izquierda) y aspecto definitivo del limitador con tirante.	119
Fig. 4.37. Prototipo definitivo con la incorporación del alambre elástico de unión entre los dos elementos del limitador de carga.....	119
Fig. 4.38. Definición de componentes de un puntal (izquierda) y esquema de ensayo (derecha) propuesto por la UNE-EN 1065 [126].	121
Fig. 4.39. Montaje del ensayo de limitadores de carga instalados en puntales.	121

Fig. 4.40. Detalle del montaje del ensayo de limitadores de carga instalados en puntales: detalle de los captadores (izquierda), del limitador con tirante (centro) y del limitador con paredes verticales (derecha). 122

Fig. 4.41. Primeros ensayos sobre el limitador con tirante (L01-A1) y el limitador con paredes verticales (L01-B1) ensayados en puntales. 123

Fig. 4.42. Gráfico Carga-Desplazamiento de los limitadores con tirante (L01-A2) y con paredes verticales (L01-B2) ensayados en puntales. 123

Fig. 4.43. Gráfico Carga-Desplazamiento de los limitadores con tirante (L01-A3) y con paredes verticales (L01-B3) ensayados en puntales. 124

Fig. 4.44. Estado final de los distintos diseños del limitador de carga tras los ensayos realizados. 125

Fig. 4.45. Instalación del ensayo de limitadores de carga de forma aislada. 125

Fig. 4.46. Limitadores de carga de los diseños A y B bajo condiciones de ensayo de forma aislada..... 126

Fig. 4.47. Gráfico Carga-Desplazamiento de los limitadores con tirante (L01-A4) y con paredes verticales (L01-B4) ensayados de forma aislada. 126

Fig. 4.48. Gráfico Carga-Desplazamiento de los limitadores con tirante (L01-A5) y con paredes verticales (L01-B5) ensayados de forma aislada. 127

Fig. 4.49. Comparación de curvas Carga-Desplazamiento de los limitadores con tirante (L01-A4 y L01-A5) y con paredes verticales (L01-B4 y L01-B5) ensayados de forma aislada..... 128

Fig. 4.50. Ensayo de caracterización del acero del Lote 01..... 129

Fig. 4.51. Resultados del ensayo de caracterización del acero para el Lote 01.... 129

Fig. 4.52. Comparación de resultados entre limitadores de carga con albergues del pasador de radios 5mm y 7mm. 130

Fig. 4.53. Curva carga-desplazamiento cualitativa para la definición del plan de ensayos. 132

Fig. 4.54. Ensayos bajo la aplicación de carga monotónica realizados a limitadores de carga ensayados de forma aislada. 134

Fig. 4.55. Ensayo bajo la aplicación de cargas repetitivas según el plan de ensayo definido para L02-AN1-3.	134
Fig. 4.56. Ensayo bajo la aplicación de cargas repetitivas según el plan de ensayo definido para L02-AN1-4.	135
Fig. 4.57. Estado del limitador de carga tras el agotamiento de la mitad del máximo desplazamiento plástico permitido.	136
Fig. 4.58. Ensayo bajo la aplicación de cargas repetitivas según el plan de ensayo definido para L02-AN1-5.	136
Fig. 4.59. Ensayo bajo la aplicación de cargas repetitivas según el plan de ensayo definido para L02-AN1-6.	137
Fig. 4.60. Ensayo de limitadores de carga del lote 02 instalados en puntales.	138
Fig. 4.61. Resultados del ensayo de caracterización del acero para el Lote 02.	138
Fig. 4.62. Calibración del modelo numérico.	140
Fig. 4.63. Comportamiento puntal más limitador de carga para modelos numéricos macro-escala.	141
Fig. 5.1. Hormigonado de la losa.	148
Fig. 5.2. Clareado de la losa.	149
Fig. 5.3. Carga en la losa.	149
Fig. 5.4. Resultados del test de caracterización del acero de los limitadores de carga del ensayo experimental.	151
Fig. 5.5. Resultados de las pruebas realizadas a dos limitadores de carga.	151
Fig. 5.6. Caja de conexiones de las galgas con las extensiones hasta la mesa de adquisición de datos.	153
Fig. 5.7. Izquierda: puntales instrumentados (en azul) y captadores de desplazamiento (en verde). Derecha: Vista general de la instalación del sistema de cimbrado y de la monitorización.	154

Fig. 5.8. Conexión de los distintos dispositivos en la mesa de adquisición de datos. 154

Fig. 5.9. Instalación de los termopares embebidos en el hormigón. 155

Fig. 5.10. Posicionamiento de las zapatas y los pilares metálicos. 155

Fig. 5.11. Instalación de las cruces de San Andrés. 156

Fig. 5.12. Instalación del sistema de cimbrado. 156

Fig. 5.13. Puntales con y sin limitadores de carga. 156

Fig. 5.14. Armado y encofrado de la losa. 157

Fig. 5.15. Hormigonado de la losa y fabricación de probetas. 157

Fig. 5.16. Clareado de la losa. 158

Fig. 5.17. Carga de arena y replanteo de piscinas. 158

Fig. 5.18. Carga de agua en piscinas. 158

Fig. 5.19. Descimbrado de la losa. 159

Fig. 5.20. Demolición de la losa. 160

Fig. 5.21. Temperatura y humedad relativa del ambiente durante el ensayo. 162

Fig. 5.22. Puntales de control de la temperatura. 163

Fig. 5.23. Variación de la carga de los puntales de control de la temperatura. 163

Fig. 5.24. Carga registrada en el puntal 65 durante el ensayo. 164

Fig. 5.25. Estado del limitador de carga del puntal 65. 164

Fig. 5.26. Posicionamiento de ejes para el cálculo de los momentos en los puntales a partir de la medida de la deformación axial del puntal mediante las tres galgas extensométricas. 165

Fig. 5.27. Flecha registrada por el captador C7 durante el ensayo. 168

Fig. 5.28. Comportamiento del puntal 43 con limitadores de carga durante el ensayo.	169
Fig. 5.29. Estado del limitador del puntal 43 en el momento que recibe la carga máxima.	169
Fig. 5.30. Distribución de termopares en la losa (T1 a 15cm es el más profundo; T2 y T4 a 10cm están en el centro de la sección; y T3 a 5 cm es el más superficial).	170
Fig. 5.31. Temperatura registrada en los termopares 1, 2 y 3.	171
Fig. 5.32. Cambios en el gradiente y la temperatura tras la disposición de la carga de arena.	172
Fig. 5.33. Termopares T5 y T6 instalados en probetas cilíndricas.	172
Fig. 5.34. Comparación de las temperaturas de la losa (termopares 2 y 4) y las temperaturas en las probetas (termopares 5 y 6).	173
Fig. 5.35. Fotografías de las probetas durante los ensayos a compresión, del módulo de elasticidad y de tracción indirecta.	174
Fig. 5.36. Secuencia de descimbrado de forma inversa a las recomendaciones establecidas como buenas prácticas.	176
Fig. 5.37. Sobrecargas registradas en el puntal de centro de vano con limitadores de carga instalados de 16.0kN durante el descimbrado.	177
Fig. 5.38. Estado del limitador de carga del puntal 45 al final de la operación de descimbrado.	177
Fig. 6.1. Evolución del módulo de elasticidad del hormigón del ensayo experimental, ajuste obtenido para los modelos numéricos y comparación con la evolución marcada por las normativas de referencia (EHE-08 [108] y EC-2 [128]).	182
Fig. 6.2. Comportamiento tenso-deformacional definido en los modelos numéricos.	183
Fig. 6.3. Validación del modelo numérico. Comparación de las cargas obtenidas experimentalmente durante el ensayo (P43-IL) con los resultados del modelo de elementos finitos (MEF-LL) para un puntal (P43) con limitador de carga (LL)... ..	187

Fig. 6.4. Validación del modelo numérico. Comparación de los desplazamientos obtenidos experimentalmente durante el ensayo (C6) con los resultados del modelo de elementos finitos (MEF-LL) para una pértiga anexa al puntal más cargado. .. 187

Fig. 6.5. Comparación de las cargas obtenidas numéricamente para el puntal 43 utilizando limitadores de carga en puntales (MEF-P43-LL) y sin el uso de limitadores de carga (MEF-P43). 190

Fig. 6.6. Comparación de los desplazamientos de la losa obtenidos numéricamente en la posición de la pértiga C6 utilizando limitadores de carga en puntales (MEF-C6-LL) y sin el uso de limitadores de carga (MEF-C6). 191

Fig. 6.7. Secuencia de descimbrado de forma inversa a las recomendaciones establecidas como buenas prácticas. 193

Fig. 6.8. Comparación de cargas del puntal 45 durante el descimbrado entre las medidas experimentalmente (P45-Exp) y las obtenidas del modelo numérico con limitadores de carga (P45-LL). 194

Fig. 6.9. Comparación de cargas del puntal 45 durante el descimbrado con limitadores de carga en puntales (P45-LL) y sin limitadores de carga (P45). 195

Fig. 6.10. Comparación de cargas del puntal 45 durante el descimbrado con limitadores de carga en puntales (P45-LL) y sin limitadores de carga (P45). 197

Fig. 6.11. Comportamiento tenso-deformacional definido en los modelos numéricos con limitadores de carga con más hueco. 198

Fig. 6.12. Comparación de cargas del puntal 45 durante el descimbrado con limitadores de carga con huecos de 2mm (P45-LL), huecos de 4mm (P45-LL+) y sin limitadores de carga (P45). 199

Fig. 6.13. Geometría de la estructura del edificio considerado y esquema del sistema de apuntalamiento. 202

Fig. 6.14. Modelización de la estructura. 204

Fig. 6.15. Posición del vano de estudio (a) y escenarios 1, 2 y 3 de fallo repentino de puntales de la planta baja (b, c y d). 205

Fig. 6.16. Comportamiento de un puntal con limitador de carga para los puntales del TERCER escenario de fallo. 207

- Fig. 6.17. Colapso progresivo del sistema de apuntalamiento en el TERCER escenario de fallo SIN el uso de limitadores de carga en los puntales.208
- Fig. 6.18. Estructura antes (a y c) y después (b y d) del evento repentino del TERCER escenario de fallo para el caso SIN limitadores de carga (a y b) y CON limitadores de carga (c y d) (unidades en mm).209
- Fig. 6.19. Pautas de comportamiento de los forjados y el sistema de apuntalamiento en el TERCER escenario de fallo SIN limitadores de carga en puntales: a) carga de los puntales bajo los forjados 1 y 2 en la posición del puntal más cargado de la planta baja, b) desplazamiento de los forjados 1 y 2 en la posición del puntal más cargado de planta baja para el vano de estudio y el vano adjunto (B), c) carga por unidad de superficies de los forjados 1 y 2 (Q) y del sistema de apuntalamiento (S) del primer y segundo nivel en el vano de estudio, y d) curvas carga-desplazamiento de los forjados 1 y 2 para la posición del puntal más cargado de la planta baja.....210
- Fig. 6.20. Pautas de comportamiento de los forjados y el sistema de apuntalamiento en el TERCER escenario de fallo CON limitadores de carga en puntales: a) carga de los puntales bajo los forjados 1 y 2 en la posición del puntal más cargado de la planta baja, b) desplazamiento de los forjados 1 y 2 en la posición del puntal más cargado de planta baja para el vano de estudio y el vano adjunto (B), c) carga por unidad de superficies de los forjados 1 y 2 (Q) y del sistema de apuntalamiento (S) del primer y segundo nivel en el vano de estudio, y d) curvas carga-desplazamiento de los forjados 1 y 2 para la posición del puntal más cargado de la planta baja.....212
- Fig. 6.21. Momentos del primer (a y b) y segundo (c y d) forjado, antes (a y c) y después (b y d) del evento accidental definido para el TERCER escenario de fallo SIN el uso de limitadores de carga en puntales (unidades en N·m/m).213
- Fig. 6.22. Momentos del primer (a y b) y segundo (c y d) forjado, antes (a y c) y después (b y d) del evento accidental definido para el TERCER escenario CON el uso de limitadores de carga en puntales (unidades en N·m/m).214
- Fig. 6.23. Comportamiento de un puntal con limitador de carga para los puntales del CUARTO escenario de fallo.216
- Fig. 6.24. Colapso progresivo del sistema de apuntalamiento en el CUARTO escenario de fallo SIN el uso de limitadores de carga en puntales.....216
- Fig. 6.25. Estructura después del evento accidental para el CUARTO escenario de fallo SIN limitadores de carga en puntales (a) y CON limitadores de carga (b) (unidades en mm).217

Fig. 6.26. Pautas de comportamiento de los forjados y el sistema de apuntalamiento en el CUARTO escenario de fallo SIN limitadores de carga en puntales: a) carga de los puntales bajo los forjados 1 y 2 en la posición del puntal más cargado de la planta baja, b) desplazamiento de los forjados 1 y 2 en la posición del puntal más cargado de planta baja para el vano de estudio y el vano adjunto (B), c) carga por unidad de superficies de los forjados 1 y 2 (Q) y del sistema de apuntalamiento (S) del primer y segundo nivel en el vano de estudio, y d) curvas carga-desplazamiento de los forjados 1 y 2 para la posición del puntal más cargado de la planta baja. 219

Fig. 6.27. Pautas de comportamiento de los forjados y el sistema de apuntalamiento en el CUARTO escenario de fallo CON limitadores de carga en puntales: a) carga de los puntales bajo los forjados 1 y 2 en la posición del puntal más cargado de la planta baja, b) desplazamiento de los forjados 1 y 2 en la posición del puntal más cargado de planta baja para el vano de estudio y el vano adjunto (B), c) carga por unidad de superficies de los forjados 1 y 2 (Q) y del sistema de apuntalamiento (S) del primer y segundo nivel en el vano de estudio, y d) curvas carga-desplazamiento de los forjados 1 y 2 para la posición del puntal más cargado de la planta baja... 221

Fig. 6.28. Momentos del primer (a y b) y segundo (c y d) forjado después del evento accidental definido para el CUARTO escenario de fallo SIN el uso de limitadores de carga en puntales (unidades en N·m/m). 222

Fig. 6.29. Momentos del primer (a y b) y segundo (c y d) forjado en $t = 1.5s$ para el CUARTO escenario de fallo CON el uso de limitadores de carga en puntales (unidades en N·m/m). 223

Fig. A1.1. Soldado de conexiones. 263

Fig. A1.2. Instalación de los captadores en las pértigas para medir desplazamientos/flechas. 264

Fig. A1.3. Aplicación del decapante en la zona de pegado de galgas. 264

Fig. A1.4. Lijado de la zona decapada para la retirada de impurezas..... 265

Fig. A1.5. Posicionamiento de la galga y aplicación del adhesivo..... 265

Fig. A1.6. Pegado de la galga..... 266

Fig. A1.7. Primera, segunda y tercera protección aplicada a las galgas de los puntales..... 266

Fig. A1.8. Puntales preparados para ser instalados..... 267

Fig. A1.9. Comprobación del correcto funcionamiento de termopares en medida continua.	267
Fig. A1.10. Distribución de puntales.	268
Fig. A1.11. Posición genérica del pasador y criterio de ejes para el cálculo de los momentos.	281
Fig. A1.12. Distribución de captadores.	302
Fig. A1.13. Distribución de puntales y captadores.	308
Fig. A1.14. Secuencia de descimbrado.	312
Fig. A2.1. Distribución de puntales y posición de pértigas.	325
Fig. A2.2. Secuencia de descimbrado.	348

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Métodos.....	60
Tabla 2.2. Estudios experimentales.....	63
Tabla 2.3. Estudios numéricos.	64
Tabla 3.1. Factores considerados.	78
Tabla 3.2. Resultados obtenidos para el forjado 1 en el tercer paso de carga para el caso con forjados de 25cm de canto y aumento de los intervalos de tiempo en 1 días.	79
Tabla 3.3. Resultados obtenidos para el forjado 1 en el tercer paso de carga.	88
Tabla 3.4. Comparación del coste de los puntales con y sin limitadores de carga.	90
Tabla 3.5. Comparación del coste total por m ² de edificio.....	90
Tabla 4.1. Diseño de experimentos correspondiente a la solución con tirante. Unidades en mm.....	112
Tabla 4.2. Diseño de experimentos correspondiente a la solución con paredes verticales. Unidades en mm.....	112
Tabla 4.3. Diseño de experimentos correspondiente a la solución con paredes verticales.....	113
Tabla 4.4 Número de repeticiones realizadas en cada punto en los ensayos realizados a los 8 limitadores de carga de cada nivel (L02-AN1 y L02-AN2).	133
Tabla 5.1. Transmisión de carga entre el forjado y los puntales durante el ensayo.	161
Tabla 5.2. Momentos y excentricidades de la carga de eje X e Y, y valor máximo, en función de la carga axial del puntal 24.....	167
Tabla 5.3. Resultados de los ensayos a compresión y del módulo de Young o módulo de elasticidad.	174
Tabla 5.4. Resultados de los ensayos de tracción indirecta (brasileño).	175

Tabla 6.1. Área equivalente de cada puntal utilizado en el ensayo experimental y porcentaje respecto al área del cuerpo del puntal. 184

Tabla 6.2. Calibración del modelo numérico en función del factor F (I). Cargas en puntales en kN/m^2 185

Tabla 6.3. Calibración del modelo numérico en función del factor F (II). Cargas en puntales en kN/m^2 186

Tabla 6.4. Cargas medias y cargas máximas obtenidas mediante simulación numérica en puntales con limitadores de carga (MEF-LL) y sin limitadores de carga (MEF). 189

RESUMEN

El cimbrado de plantas sucesivas es la técnica más empleada en la actualidad para la construcción de estructuras de edificios de hormigón armado. El uso de esta técnica permite que las plantas recientemente hormigonadas se apoyen sobre los forjados inferiores a través de cimbras. Considerando las particularidades que tiene el cimbrado de plantas sucesivas, es muy importante poder estimar cómo se produce la transmisión de cargas entre las cimbras y forjados, con el fin de mantener la adecuada seguridad estructural y evitar situaciones de riesgo, e incluso colapso, durante la construcción de edificios. La transmisión de cargas entre cimbras y forjados durante todas las etapas constructivas de un edificio es un fenómeno complejo, que ha sido estudiado por muchos investigadores, sobre todo en los últimos años.

La construcción de edificios con estructura de hormigón armado se realiza, habitualmente, con la ayuda de puntales siendo uno de los componentes principales de las cimbras. Estos puntales son los encargados de transmitir las cargas de las plantas recién hormigonadas a las inferiores. Los principales problemas que presenta el empleo de puntales vienen de: a) la posible aparición de cargas en los puntales superiores a las previstas, que pueden provocar el colapso de toda la cimbra o incluso de todo el edificio, y b) los catálogos comerciales son muy limitados en cuando a la variedad de puntales disponibles, lo que obliga a que, en la mayor parte de las ocasiones, los puntales empleados estén claramente sobredimensionados. En esta tesis doctoral se presenta la investigación llevada a cabo en la Universitat Politècnica de València para desarrollar e implementar en el mercado un nuevo dispositivo limitador de carga (LL por sus siglas en inglés) a colocar en puntales, que servirá para mejorar la seguridad y reducir los costes durante la construcción de estructuras de edificios. El estudio llevado a cabo demuestra que la unión de dos áreas, como son la ingeniería mecánica y civil, hacen posible el desarrollo de un innovador dispositivo que puede revolucionar las técnicas de cimbrado actuales.

La metodología que se ha seguido para el diseño, desarrollo e implementación del limitador de carga conlleva: a) un estudio preliminar de la viabilidad técnico-económica de su aplicación, b) el diseño conceptual y de detalle mediante simulaciones numéricas así como con el empleo de la técnica del diseño de experimentos, c) una amplia campaña experimental donde se ensaya el limitador de carga y el conjunto puntal-limitador, d) una simulación detallada del diseño final y la formulación de un modelo simplificado que tiene en cuenta el comportamiento conjunto puntal-limitador, e) el desarrollo de un ensayo experimental a escala real para comprobar su correcto funcionamiento bajo condiciones reales a modo “prueba de concepto”, y f) un estudio numérico final para evaluar y cuantificar algunas de las

múltiples ventajas del uso de limitadores de carga en puntales durante la construcción de estructuras de edificios.

Ingenieros, arquitectos y constructores podrán encontrar en este trabajo una excelente guía para la comprensión del comportamiento y el uso de limitadores de carga en puntales. Este dispositivo podrá ser empleado en el día a día del diseño de estructuras edificios y su construcción, revolucionando las técnicas de cimbrado actuales.

Palabras clave: *colapso, construcción, coste, diseño de experimentos, eficiencia estructural, encofrado, estructuras de edificios, fallo, forjados, limitador de carga, puntales, seguridad.*

ABSTRACT

Shoring successive floors is at present the most frequently used technique when constructing reinforced concrete building structures. This technique allows the recently poured slabs to be supported by the lower slabs by means of shores. Considering the particular characteristics of shoring successive floors, it is very important to be able to estimate how loads are transmitted between shores and slabs in order to maintain adequate structural safety and avoid situations of risk or even collapse in buildings under construction. The transmission of loads from shores to slabs during all the construction stages is a complex phenomenon and has been the subject of numerous studies, especially in recent years.

When constructing reinforced concrete building structures, shores are normally used being the main components of the shoring systems. These shores allow the transmission of loads from freshly poured slabs to lower floors. However, certain problems are involved in this process, including: a) the loads on the shores may be higher than expected, which can lead to the collapse of the shoring system or even of the whole structure, and b) the limited range of shore types in commercial catalogues, which often means that the shores used are oversized. This thesis describes the study carried out at Universitat Politècnica de València on the development and implementation of a new load-limiter (LL) that can be fitted to shores to improve safety and reduce the cost of constructing building structures. The study shows that combining mechanical and civil engineering fields made it possible to produce a novel device that could revolutionise the shoring techniques at present in use.

The methodology used to design, develop and implement load limiters involved: a) a preliminary study of the technical-economic viability of its application, b) the conceptual and detailed design of prototypes by using numerical simulations and the design of experiments (DOE) technique, c) an ambitious experimental campaign in which load limiters and shores-load limiters as a unit were tested, d) a detailed simulation of the final design and the formulation of a simplified model that considers the behaviour of the shore-load limiter as a unit, e) the development of a full-scale experimental test to verify its correct behaviour under real conditions as a “proof of concept”, and f) a numerical study to evaluate some of the multiple advantages of the use of load limiters on shores during the construction of building structures.

Engineers, architects and builders could also find in this work an excellent guide to understand the load limiters behaviour and to use them on shores, that can be used

in the day to day of the design of building structures and their construction, revolutionising the current shoring techniques.

Keywords: *building, building structures, collapse, cost, DOE, failure, formwork, load limiter, props, safety, shores, slabs, structural efficiency.*

RESUM

L'apuntament de plantes successives es la tècnica més utilitzada en l'actualitat per a la construcció d'estructures d'edificis de formigó armat. L'ús d'esta tècnica permet que les plantes recentment formigonades es recolzen sobre els forjats inferiors a través de cimbres. Considerant les particularitats que té l'apuntament de plantes successives, és molt important poder estimar com es produïx la transmissió de càrregues entre les cimbres i forjats, a fi de mantindre l'adequada seguretat estructural i evitar situacions de risc, i inclús col·lapse, durant la construcció d'edificis. La transmissió de càrregues entre cimbres i forjats durant totes les etapes constructives d'un edifici és un fenomen complex, que ha sigut estudiat per molts investigadors, sobretot en els últims anys.

La construcció d'edificis amb estructura de formigó armat es realitza, habitualment, amb l'ajuda de puntals que representen un dels components principals de les cimbres. Estos puntals són els encarregats de transmetre les càrregues de les plantes recentment formigonades a les inferiors. Els principals problemes que presenta l'ús de puntals vénen de: a) la possible aparició de càrregues en els puntals superiors a les previstes, que poden provocar el col·lapse de tota la cimbra o inclús de tot l'edifici, i b) els catàlegs comercials són molt limitats en quan a la varietat de puntals disponibles, la qual cosa obliga que, en la major part de les ocasions, els puntals empleats estiguen clarament sobredimensionats. En esta tesi doctoral es presenta la investigació duta a terme en l'ICITECH per a obtindre i implementar un nou dispositiu limitador de càrrega (LL per les seues sigles en anglès) a col·locar en puntals, que servirà per a millorar la seguretat i reduir els costos durant la construcció d'estructures d'edificis. L'estudi dut a terme demostra que la unió de dos àrees, com són l'enginyeria mecànica i civil, fan possible l'obtenció d'un innovador dispositiu que pot revolucionar les tècniques d'apuntament actuals.

La metodologia que s'ha seguit per al disseny, obtenció i implementació del limitador de càrrega comporta: a) un estudi preliminar de la viabilitat tècnico-econòmica de la seua aplicació, b) el disseny conceptual i de detall per mitjà de simulacions numèriques i amb l'ús de la tècnica del disseny d'experiments, c) una àmplia campanya experimental on s'assaja el limitador de càrrega i el conjunt puntal-limitador, d) una simulació detallada del disseny final i la formulació d'un model simplificat que té en compte el comportament conjunt puntal-limitador, e) la realització d'un assaig experimental a escala real per a comprovar el seu funcionament correcte baix condicions reals a mode prova de concepte, i f) un estudi numèric final per a avaluar i quantificar alguns dels múltiples avantatges de l'ús de limitadors de càrrega en puntals durant la construcció d'estructures d'edificis.

Enginyers, arquitectes i constructors podran trobar en este treball una excel·lent guia per a la comprensió del comportament i l'ús de limitadors de càrrega en puntals. Aquest dispositiu podrà ser empleat en el dia a dia del disseny d'estructures d'edificis i la seua construcció, revolucionant les tècniques d'apuntalament actuals.

Paraules clau: col·lapse, construcció, cost, disseny d'experiments, eficiència estructural, encofrat, estructures d'edificis, fallo, forjats, limitador de càrrega, puntals, seguretat.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1. Introducción

El método más empleado para la construcción de estructuras de edificios de hormigón armado se basa en el cimbrado de plantas sucesivas, donde el peso de los forjados recién hormigonados se reparte entre una o más plantas consecutivas, que permanecen cimbradas. La estructura temporal de apuntalamiento de cada planta está compuesta, habitualmente, por: puntales, sopandas y tableros de encofrado. La Fig. 1.1 muestra un esquema del sistema de apuntalamiento y un detalle de los diferentes elementos que componen un puntal. Aunque existen otros tipos de puntales en el mercado, la Fig. 1.1 muestra uno de los más empleados en la actualidad, que ha sido utilizado como referencia en el desarrollo de esta tesis doctoral. El ajuste de este tipo de puntal se realiza a través del bloqueo de la caña (tubo superior del puntal) con el pasador. Este pasador, a su vez, apoya sobre la campana, que le proporciona un apoyo suave y transmite la carga a la rosca (parte superior del cuerpo del puntal). La rosca permite un ajuste fino de la altura del puntal para su correcto uso en obra.

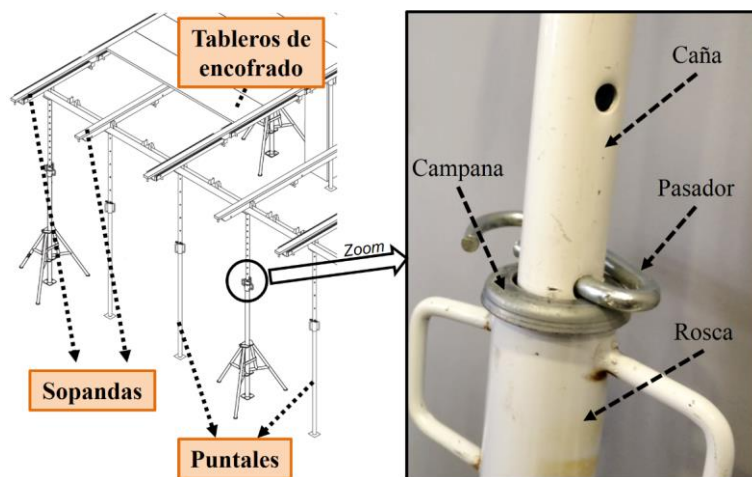


Fig. 1.1. Esquema del sistema de apuntalamiento y detalle de un puntal.

Algunos de los estudios publicados hasta la fecha indican que una de las fases más críticas en cuanto a la seguridad es la fase de construcción [1–5]. Durante esta fase, las cargas que reciben los forjados pueden ser incluso superiores a sus cargas de diseño [6–8]. Si además existe la posibilidad de fallo de la estructura temporal de soporte de los forjados (cimbra), la situación puede desencadenar en un fallo global

de toda la estructura durante la construcción [9–11]. En la historia reciente se han registrado muchos colapsos de estructuras de edificios de hormigón armado durante su construcción [12]. La mayoría de los colapsos tuvieron como desencadenante un fallo local que, a través de una serie de fallos en cadena, provocaron el colapso de toda una estructura o de una parte desproporcionada de ella.

A raíz de los estudios previamente realizados, puede indicarse que dos de los problemas actuales en este tipo de sistemas de cimbrado son: a) los puntales están sometidos, en ocasiones, a cargas superiores a su capacidad resistente, provocando colapsos durante la construcción de edificios [12–14], y b) los fabricantes disponen de una gama reducida de puntales que obliga a los constructores y proyectistas a utilizar puntales sobredimensionados, con el fin de asegurar la seguridad del sistema de cimbrado.

La principal novedad de esta tesis doctoral aparece al plantear una solución práctica a los dos problemas indicados con anterioridad, e incluye el desarrollo de un nuevo dispositivo mecánico incorporado a los puntales: limitador de carga (LL por sus siglas en inglés). El limitador de carga, protegido bajo la patente ES2636833, está formado por una pareja de elementos de control de la carga de los puntales, asegurando que el puntal no va a alcanzar su carga admisible. El desarrollo propuesto puede cambiar de forma drástica la construcción de estructuras de edificios mediante estructuras temporales de apuntalamiento y, de esta forma, presentar un nuevo enfoque al sector de la construcción a nivel nacional e internacional. El estudio llevado a cabo se ha centrado en el caso particular de las estructuras de edificios durante la construcción donde el limitador de carga pretende:

- Aumentar la seguridad durante la construcción para minimizar el número de fallos y colapsos ocurridos.
- Reducir los costes durante la construcción, tal y como han perseguido tradicionalmente las empresas de cimbras del sector a través de nuevos procesos constructivos como el clareado y el recimbrado.

Por un lado, este nuevo dispositivo aumentará la seguridad durante la construcción y reducirá el riesgo de colapsos-fallos originados por el fallo de los puntales. Por otro lado, el uso de limitadores de carga permitirá el uso de puntales de menor resistencia que la requerida inicialmente sin el uso de limitadores de carga (más económicos), ya que limitan la carga que recibe cada puntal a valores inferiores de su carga admisible. Esto último también simplificará el manejo en obra de los puntales, ya que permite el empleo de puntales menos pesados.

El estudio de esta tesis doctoral ha sido desarrollado dentro del grupo de investigación “Construcción de edificios mediante sistemas de cimbrado de plantas sucesivas”, del Instituto Universitario de Ciencia y Tecnología del Hormigón (ICITECH) de la Universitat Politècnica de València (UPV). Este grupo de investigación cuenta con una larga trayectoria de más de 25 años y multitud de

realizaciones y publicaciones anteriores relacionadas con la temática, que han permitido partir de una base muy sólida para el desarrollo de la presente tesis doctoral.

Además, la realización de tesis doctoral ha contado con diversas fuentes de financiación pública y privada. El desarrollo de la tesis doctoral recibió financiación de entidades públicas como el Ministerio de Educación, Cultura y Deporte de España [FPU13/02466] y de la Generalitat Valenciana [GV/2015/063], y de entidades privadas como la empresa Encofrados J. Alsina, S.A. (Alsina) y la empresa Levantina, Ingeniería y Construcción, S.L. (LIC).

1.2. Objetivos

La principal novedad de la tesis doctoral se basa en el diseño y desarrollo de un limitador de carga en puntales a nivel prototipo y a escala preindustrial. El objetivo principal de este proyecto consiste, por tanto, en optimizar el proceso de construcción de edificios de forjados de hormigón in situ mediante el uso de limitadores de carga en las cimbras. Los objetivos específicos que permitirán alcanzar el objetivo principal son:

- Diseñar un limitador de carga en puntales con elementos de control de la carga antes y después de alcanzar la carga límite deseada.
- Desarrollar modelos numéricos a nivel macro-escala y micro-escala. Por un lado, los modelos macro-escala permitirán realizar estudios preliminares para el estudio de la viabilidad técnico-económica de la aplicación de los limitadores de carga en puntales en la construcción completa de estructuras de edificios. Por otro lado, los modelos numéricos micro-escala permitirán dirigir el diseño de los limitadores de carga y prever la respuesta de los mismos en función de su diseño.
- Fabricar y ensayar los limitadores de carga escogidos en la fase de diseño, para comprobar su correcto funcionamiento y validar el diseño finalmente escogido.
- Desarrollar un ensayo experimental a escala real. Con la realización de un ensayo experimental a modo “prueba de concepto” se conseguirá comprobar la validez y las ventajas del uso de limitadores de carga en puntales bajo condiciones reales y demostrar su posible aplicación en la construcción de estructuras de edificios.
- Aplicar los modelos numéricos macro-escala, calibrados y validados, para el estudio de detalle de diferentes efectos positivos en la aplicación de limitadores de carga en puntales durante la construcción de estructuras de edificios.

1.3. Contenido

El contenido de la tesis doctoral se ha organizado en diferentes capítulos, tras los que se proporcionan las referencias citadas en el documento y diferentes apéndices.

El Capítulo 2 trata los antecedentes y el estado del arte relativo al cimbrado y descimbrado de estructuras de edificios. Se tratan aspectos como las variantes de diferentes sistemas de apuntalamientos y procesos constructivos, el cálculo de dichos procesos constructivos y los antecedentes al limitador de carga en puntales desarrollado.

El Capítulo 3 analiza la viabilidad técnico-económica de los limitadores de carga mediante simulación numérica, como método preliminar de análisis de la validez del nuevo concepto. Este análisis se realiza para dos estructuras de edificios diferentes. En la primera se estudia la viabilidad técnica en la construcción de un edificio experimental anteriormente ejecutado y ampliamente estudiado por el grupo de investigación. En la segunda se estudia la viabilidad técnico-económica de la aplicación de limitadores de carga en puntales en la construcción de un edificio real.

El Capítulo 4 presenta la fase de diseño, fabricación, ensayo y simulación de limitadores de carga. Tras las primeras ideas conceptuales, se define el diseño de detalle con ayuda de la simulación numérica y la técnica del diseño de experimentos. Una vez alcanzados los distintos diseños definitivos se presenta la fabricación y ensayo de distintos lotes de limitadores de carga, la calibración de los modelos numéricos y una metodología simplificada para su simulación en modelos macro-escala.

El Capítulo 5 describe la prueba de concepto aplicando los limitadores de carga en puntales en la ejecución de un ensayo experimental a escala real para comprobar su correcto comportamiento bajo condiciones reales. En este capítulo se presenta el dimensionamiento del ensayo, la preparación y descripción del ensayo y los resultados obtenidos. En el Apéndice 1 se presenta una amplia recopilación de los resultados obtenidos en el ensayo experimental.

En el Capítulo 6 se realizan diferentes estudios a nivel numérico con modelos calibrados y validados que pretenden incidir en los efectos positivos del limitador de carga. Estos estudios numéricos se centran en los casos del ensayo experimental ejecutado en el marco de esta tesis doctoral y de la construcción de otra estructura de edificio. En ambos casos se analizan diferentes aspectos sobre qué hubiera pasado con y sin el uso de limitadores de carga en puntales. En el Apéndice 2 se presenta una amplia recopilación de los resultados obtenidos.

El Capítulo 7 recopila las conclusiones obtenidas en el desarrollo de la tesis doctoral, enfatiza la aportación original de la misma respecto a los antecedentes encontrados y descritos en el capítulo 2, y establece las posibles futuras líneas de investigación.

Este capítulo se realiza en español e inglés para cumplir con uno de los requisitos de la mención internacional del doctorado del autor de la tesis doctoral.

Finalmente, el Apéndice 3 recopila las publicaciones ya realizadas por el autor de la tesis y relacionadas con la tesis doctoral.

CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

2.1. Introducción

Multitud de investigadores han estudiado la fase de construcción de estructuras de edificios de hormigón armado. La magnitud de las cargas y su distribución espacial durante la construcción de estructuras de edificios ha sido una de las áreas estudiadas. De su correcta consideración en la fase de diseño de la cimbra depende en gran medida la seguridad de la estructura temporal de apuntalamiento. La seguridad o fiabilidad de las estructuras de edificios durante la construcción, que depende de multitud de variables, también ha sido otra de las áreas más estudiadas.

Sin embargo, la mayor parte de las investigaciones se han centrado en la comprensión de cómo se transmiten las cargas entre los forjados y la cimbra durante la construcción de estructuras de edificios; desde el desarrollo de diversos métodos de cálculo para estimar esta transmisión de cargas, hasta largos y profundos estudios numéricos y experimentales para alcanzar una mayor comprensión de la compleja interacción entre forjados y puntales.

Dentro de esta área de investigación, muchos han sido también los trabajos de recopilación y estudio de fallos o colapsos de estructuras de edificios durante su construcción. Aunque en estos trabajos se realizó un gran esfuerzo por detectar las causas de fallo o colapso y establecer medidas de mitigación para evitar este riesgo, pocos han sido los esfuerzos realizados para aumentar la resiliencia de las estructuras temporales de apuntalamiento durante la construcción, y evitar de esta forma el colapso de la cimbra y el posible colapso progresivo de la estructura completa. Es aquí, y en la búsqueda de una mayor seguridad durante la construcción, donde incide el desarrollo del limitador de carga presentado en esta tesis doctoral para el que, en este capítulo, se presentan los escasos antecedentes encontrados. Los antecedentes recopilados, aunque conceptualmente estén muy alejados del desarrollo llevado a cabo, ilustran de forma correcta el estado de la técnica de forma general.

En la primera parte de este capítulo se describen los sistemas y procesos de cimbrado para estructuras de edificios durante la construcción. Seguidamente se trata el cálculo del proceso constructivo de estructuras de edificios con especial énfasis a: a) los fallos y colapsos ocurridos durante la construcción, b) la importancia de las cargas consideradas en esta fase, y c) la transmisión de cargas entre forjados conectados por puntales desde el punto de vista de los métodos de cálculo existentes y los estudios experimentales y numéricos realizados. A continuación, se describen los

antecedentes al limitador de carga desarrollado en esta tesis doctoral. Finalmente, se establecen una serie de conclusiones relativas al estado del arte.

2.2. Sistemas de apuntalamiento y procesos constructivos de estructuras de edificios

El cimbrado de plantas sucesivas es el método más utilizado para la construcción de estructuras de edificios de hormigón armado. Este método consiste en apoyar la cimbra de la planta que se va a hormigonar sobre la última planta construida, manteniendo total o parcialmente cimbradas algunas de las plantas inferiores. Así, el peso de la nueva planta hormigonada, y las posibles sobrecargas de construcción, se distribuyen en una o varias plantas inferiores. La retirada, total o parcial, de las cimbras de las plantas más bajas, permite su reutilización en las plantas superiores para futuros hormigonados.

Los principales componentes de la cimbra son los tableros de encofrado, las sopandas y los puntales. Los tableros de encofrado proporcionan la forma definitiva al hormigón, mientras que el conjunto puntales-sopandas permiten una correcta fijación y soporte de los tableros de encofrado.

Las empresas proveedoras de cimbras desarrollan sus propios componentes, decidiendo consecuentemente la forma y el material utilizado de cada uno de los elementos. Por ejemplo, existen diversos tipos de puntales fabricados en diferentes materiales como la madera, más utilizados en continentes como Asia o África, o el acero, propios de países occidentales y más desarrollados. A pesar de esta diversidad, los puntales telescópicos de acero son los más empleados y se pueden englobar principalmente en dos tipos [15]: a) con rosca visible, o b) con rosca oculta o cubierta (Véase Fig. 2.1).

También existen diferentes tipos de sistemas de cimbrado combinando, de diferente forma, los distintos componentes de una cimbra (tableros de encofrado, sopandas y puntales). Los sistemas de cimbrado más utilizados en la construcción de forjados de hormigón in situ en edificación son los sistemas de puntales y los de mesas.

Los sistemas de puntales (Véase Fig. 2.2) emplean y combinan cada componente de forma individual. Dentro de estos sistemas se pueden diferenciar entre aquellos preparados para la ejecución de forjados de losa maciza (Véase Fig. 2.2 izquierda) y aquellos preparados para la ejecución de forjados reticulares, bien sean de casetón perdido o recuperable (Véase Fig. 2.2 derecha).

Los sistemas de mesas son un conjunto estructural, rígidamente unido y compuesto por puntales, cabezales, vigas y tableros de encofrado (Fig. 2.3) cuya combinación de los diferentes componentes se realiza por módulos, trabajando cada uno de los módulos de forma conjunta a modo de “mesa” de soporte.

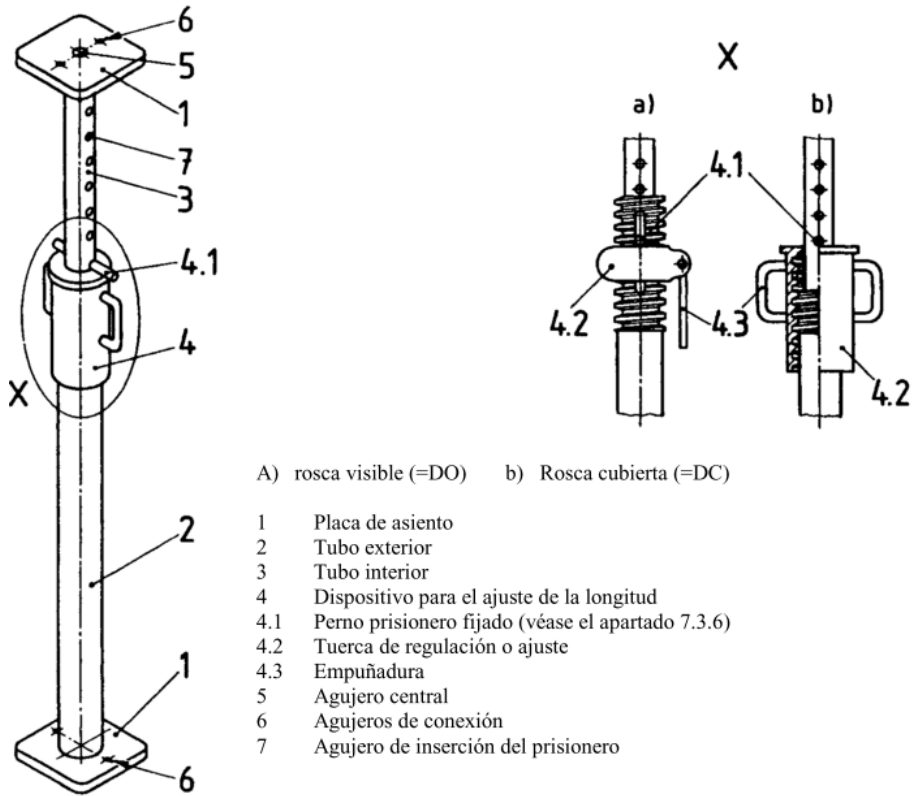


Fig. 2.1. Puntal telescópico regulable de acero con rosca visible o rosca cubierta [15].

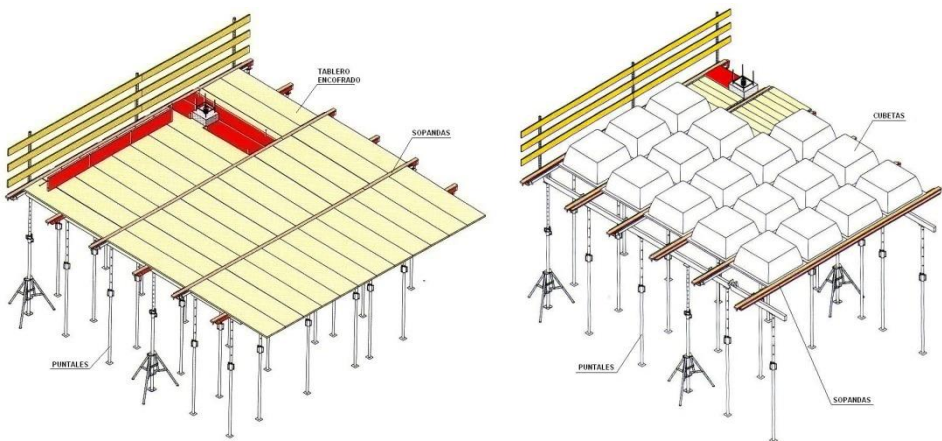


Fig. 2.2. Sistema para la ejecución de forjados de losa maciza (izquierda) y para la ejecución de forjados reticulares (derecha) [16].

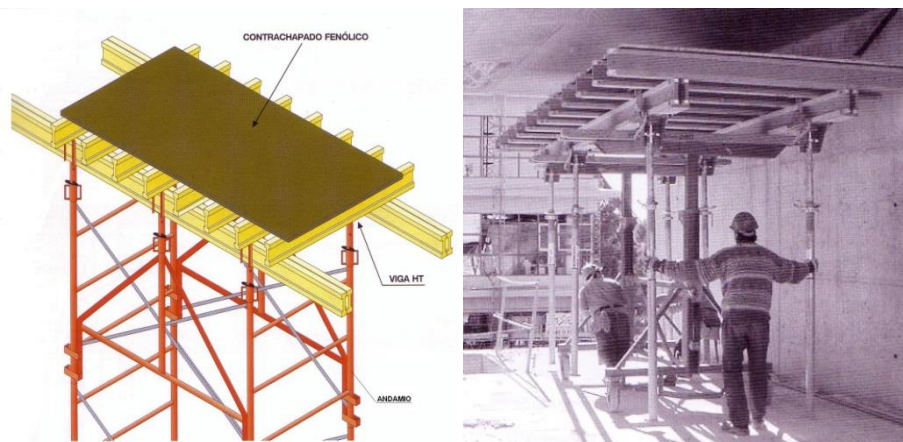


Fig. 2.3. Sistema de mesas [16].

En cada una de las plantas cimbradas pueden realizarse diferentes operaciones. Dos operaciones siempre necesarias son el cimbrado, con el que poder sostener el nuevo forjado hormigonado, y el descimbrado, cuando los puntales son retirados en el momento en el que los forjados tienen suficiente resistencia para resistir su peso propio y las cargas aplicadas sobre ellos.

Los rendimientos en la construcción de forjados de edificación están muy relacionados con un rápido descimbrado o recuperación del material empleado para reutilizarlo en la construcción de plantas superiores. Este factor ha contribuido a la aparición de nuevas técnicas de construcción, como son el clareado y el recimbrado, que permiten optimizar la utilización de los sistemas de cimbrado. Consecuentemente, además del cimbrado y descimbrado, el clareado o el recimbrado son operaciones intermedias que habitualmente se emplean en la construcción de estructuras de edificios.

En los siguientes sub-apartados se trata en profundidad cada uno de los procesos constructivos y la secuencia constructiva que habitualmente se realiza en cada uno de los tipos.

2.2.1. Apuntalamiento en un proceso de cimbrado / descimbrado (CD)

En el proceso de cimbrado y descimbrado (en adelante proceso de CD) solo intervienen dos etapas claramente definidas, la colocación de la cimbra, donde se vierte el hormigón, y la retirada de esta cuando los forjados hayan adquirido suficiente resistencia. En este proceso existirán el número de plantas consecutivas cimbradas que sean necesarias para redistribuir la carga entre distintos forjados y acelerar la construcción de la estructura. Habitualmente, el número de plantas consecutivas adoptado es de dos, tres, o cuatro plantas consecutivas cimbradas,

aunque pueden ser adoptadas otras variantes. La Fig. 2.4 muestra un edificio con un proceso constructivo CD y con tres plantas consecutivas cimbradas.



Fig. 2.4. Ejemplo de edificio en construcción con un proceso constructivo CD.

2.2.2. Apuntalamiento en un proceso de cimbrado / clareado / descimbrado (CCD)

El clareado consiste en la retirada de más del 50% de los componentes del sistema de apuntalamiento sin llegar a descimbrar completamente el forjado, pocos días después de ser hormigonado. Con esta operación se consigue, por un lado, una descarga parcial del sistema de apuntalamiento, dada la reducción de rigidez del conjunto, y por otro, un descenso de la carga soportada por los forjados respecto a la que hubieran soportado en el caso de proceder a un descimbrado total. De forma individual, al realizar la operación de clareado cada puntal también asume mayor carga debido a su mayor área tributaria bajo el forjado.

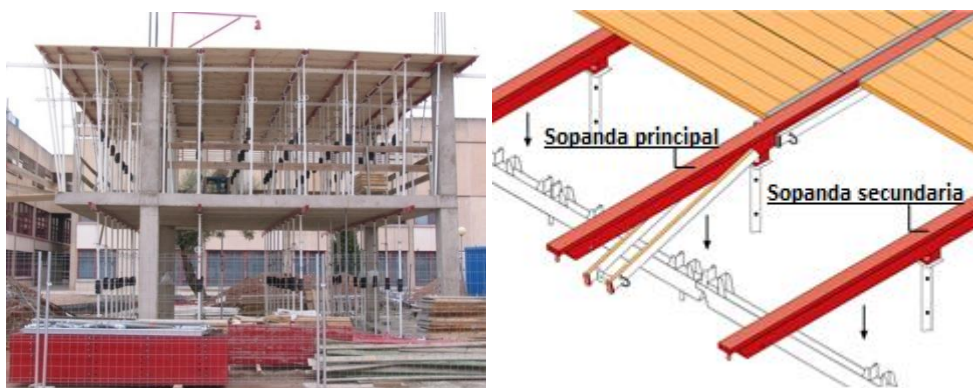


Fig. 2.5. Ejemplo de edificio en construcción con un proceso constructivo CCD (izquierda) y detalle de colocación de sopandas principales y sopandas secundarias (derecha).

Además, con el clareado se reduce significativamente el material necesario para el encofrado y cimbrado, mejorando así notablemente la economía. La Fig. 2.5 muestra el desarrollo del proceso de cimbrado, clareado y descimbrado (en adelante proceso de CCD) para un momento de la construcción donde se observa un primer forjado clareado al 50% y un segundo forjado completamente cimbrado. La misma figura muestra el mecanismo que permite extraer todo el tablero de encofrado, dejando instalados los puntales correspondientes a las sopandas principales y retirando todos los puntales y las sopandas correspondientes a las sopandas secundarias.

2.2.3. Apuntalamiento en un proceso de cimbrado / recimbrado / descimbrado (CRD)

El recimbrado consiste en la retirada de todos los puntales que sostienen un forjado recién hormigonado, pocos días después de su ejecución, para después volverlos a instalar de forma que contribuyan a resistir futuros incrementos de carga. En esta etapa del proceso constructivo se descargan totalmente los puntales, asumiendo los forjados toda la carga aplicada sobre ellos. Posteriormente, una vez reinstalados los puntales, el sistema de apuntalamiento asume parcialmente, junto con el forjado, las posibles cargas que se transmiten desde las plantas superiores.

También en este caso se consigue reutilizar parte del material empleado en una planta con el objetivo de reducir costes reutilizando el material recuperado en la construcción de plantas superiores. El recimbrado permite la recuperación de todos los tableros de encofrado y las sopandas. Sin embargo, habitualmente requiere la colocación nuevamente de parte o de la totalidad de los puntales. La Fig. 2.6 muestra un forjado unidireccional con los puntales recimbrados.



Fig. 2.6. Ejemplo de una planta de un edificio en construcción con un proceso constructivo CRD.

2.2.4. Operaciones en los diferentes procesos constructivos

En resumen y de forma general, con la técnica del clareado se consigue que cada puntal absorba más carga, mientras que los forjados recién hormigonados se cargan menos, todo ello con respecto a la técnica del recimbrado. Actualmente, es habitual emplear una de estas dos operaciones intermedias, ya que permiten una rápida recuperación de gran parte del material empleado (encofrado, sopandas y puntales) con el objetivo de reutilizarlo en la construcción de plantas superiores. Se consigue, además, en la mayoría de casos, una reducción del plazo de construcción.

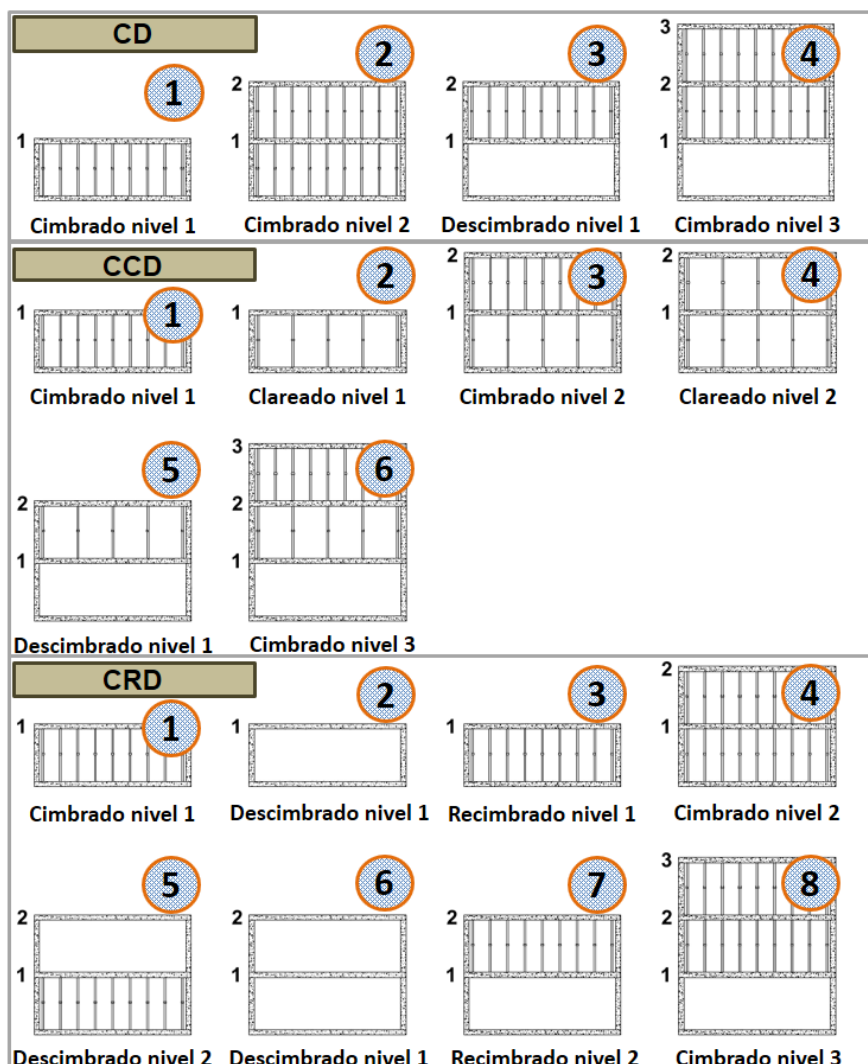


Fig. 2.7. Operaciones de cada uno de los procesos constructivos para el caso de dos plantas consecutivas apuntaladas hasta el hormigonado del tercer nivel.

Combinando las distintas operaciones existentes (cimbrado, clareado, recimbrado y descimbrado), los procesos constructivos habitualmente empleados actualmente son: el cimbrado/descimbrado (CD), el cimbrado/clareado/descimbrado (CCD), y el cimbrado/recimbrado/descimbrado (CRD). En la Fig. 2.7 se puede observar esquemáticamente como se producirían estos tres procesos constructivos hasta el cimbrado del nivel tres de un edificio con dos plantas consecutivas cimbradas. Además de los puntales necesarios en cada tipo de proceso constructivo, como se representa en la Fig. 2.7, los procesos CCD y CRD requieren la mitad de encofrado que un proceso CD, ya que en las operaciones de clareado o recimbrado se recupera todo el encofrado.

2.3. Cálculo de procesos constructivos de estructuras de edificios

Conocer cómo se transmiten las cargas entre las cimbras y los forjados durante la construcción de un edificio es un problema realmente complejo, que ha sido estudiado por multitud de autores. Por una parte, los estudios experimentales son la única vía para conocer realmente cómo se produce esta transmisión de cargas. Sin embargo, en el campo de la construcción, un ensayo experimental a escala real acarrea grandes costes, que serán desmesurados en la mayoría de los casos. En este punto es cuando los estudios numéricos son realmente importantes para conocer cómo se comportan las estructuras durante la construcción, sin necesidad de utilizar grandes recursos económicos. Estos estudios numéricos también permiten abordar multitud de casos de estudio que, de otra forma, serían imposibles de acometer porque supondría un coste excesivo. Por otra parte, los métodos de cálculo, y sobre todo los métodos simplificados, pueden ser utilizados por consultorías, empresas de encofrados y empresas constructoras, acercando de esta forma el conocimiento generado por las universidades y sus investigadores a la construcción real de estructuras de edificios.

En este apartado se presenta una recopilación que incluye todos los métodos de cálculo, estudios experimentales y estudios numéricos llevados a cabo hasta la fecha, en los cuales se analiza y determina la transmisión de cargas entre forjados y cimbras durante la construcción de estructuras de edificios de hormigón armado. Esta recopilación permite conocer el estado actual del tema, fomentar la aplicación práctica de los diferentes desarrollos llevados a cabo recientemente y poder analizar dónde se precisa investigar en el futuro.

A continuación se presenta: a) la importancia de conocer la magnitud y distribución de las cargas existentes durante la construcción de edificios, b) una recopilación de todos los métodos de cálculo planteados hasta la fecha para la estimación de la transmisión de cargas entre forjados y cimbras durante la construcción de estructuras de edificios, c) una extensa recopilación de todos los estudios experimentales llevados a cabo, y d) una recopilación de los estudios numéricos divididos en

aquellos que estudian la transmisión de cargas sin incluir los efectos de la temperatura, retracción o fluencia, aquellos que consideran los efectos de retracción y fluencia, y aquellos que consideran los efectos de la temperatura.

2.3.1. La importancia de conocer la magnitud y la distribución de las cargas existentes durante la construcción de estructuras de edificios

A lo largo de los años, han ocurrido un importante número de fallos y colapsos de estructuras de edificios durante su construcción. Diferentes autores han destacado y recopilado las principales causas de estos colapsos y las posibles medidas de mitigación. Entre ellos, se pueden destacar los trabajos realizados por Feld [17] en 1974, Carper [1] y Hadipriono & Wang [2] en 1987, Eldukair & Ayyub [18] en 1991, Kaminetzy & Stivaros [4] en 1994 y Khudeira [19] en 2010. Más recientemente, Buitrago et al. [12] realizaron una recopilación exhaustiva de fallos reportados en estructuras de edificios durante su construcción en el periodo comprendido entre los años 2012 y el 2017. En este último trabajo también se presentó una extensa compilación de las causas de los colapsos y las medidas de mitigación de los riesgos existentes.

Una de las causas más importantes de fallo es la carga que reciben los puntales, mayor en muchos casos que la carga esperada. Como ejemplo real de este tipo de fallo se presentan la Fig. 2.8 y la Fig. 2.9 donde se pueden observar multitud de puntales pandeados debido a cargas superiores a sus cargas admisibles. Otros puntales, aunque no aparezcan doblados, pueden también estar inoperativos si su modo de rotura es por plastificación del pasador.

Las consecuencias de este fallo pueden ser muy graves, llegando a colapsar el forjado que sustentan dichos puntales (Véase Fig. 2.10), o incluso provocando un colapso progresivo de la estructura completa.



Fig. 2.8. Pandeo de puntales durante la construcción de un edificio (I) [20].



Fig. 2.9. Pandeo de puntales durante la construcción de un edificio (II).



Fig. 2.10. Colapso de una planta debido al fallo de un puntal [12].

En otros casos, las consecuencias no son tan graves. Sin embargo, la durabilidad de la estructura y su condición de servicio se verían gravemente afectadas debido a la fisuración y las largas deformaciones producidas en la estructura durante su fase de construcción, en presencia de hormigones muy jóvenes. Un ejemplo claro se muestra en la Fig. 2.11, donde se puede observar un forjado unidireccional durante la construcción, con flechas excesivas y fisuras en la parte inferior de las viguetas.

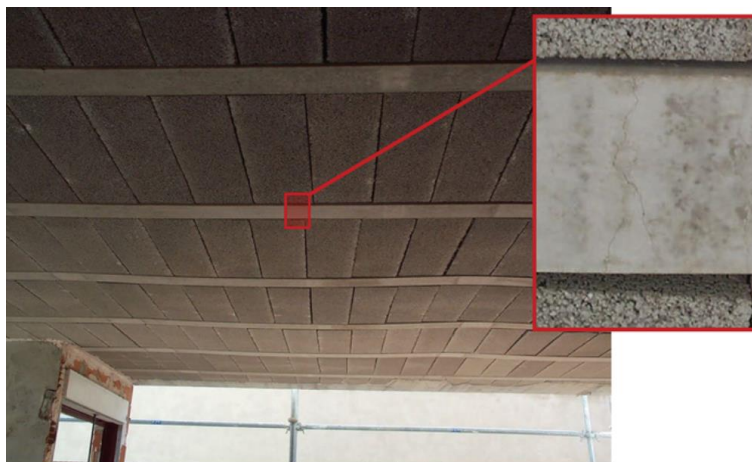


Fig. 2.11. Fisuras y flechas excesivas tras el descimbrado [12].

Uno de los aspectos más importantes y ampliamente estudiados para reducir el riesgo de fallo o colapso de edificios durante su construcción es la magnitud y distribución espacial de las acciones permanentes y sobrecargas que se pueden presentar. Las sobrecargas son las acciones con una mayor incertidumbre asociada, tanto en su magnitud como en su distribución espacial. De hecho, estas sobrecargas son las que han recibido una mayor atención por parte de la comunidad científica. Ya en el año 1994, Karshenas & Ayoub [21,22] desarrollaron un modelo estocástico para determinar qué carga uniformemente distribuida debía aplicarse para producir el mismo efecto que las sobrecargas reales. En el mismo año, Rosowsky et al. [23] analizaron cómo diferentes colocaciones del hormigón afectaban a las cargas de la estructura. En 1998, Kothekar [24] monitorizó las cargas en puntales durante y después del hormigonado, con el objetivo de estudiar la magnitud de las cargas permanentes y sobrecargas. Más tarde, en el año 2001, Rosowsky & Stewart [25] desarrollaron un modelo probabilístico para la determinación de cargas durante la construcción, considerando picos de carga, distribuciones probabilísticas y sobrecargas (constantes, acopio de material y cargas en movimiento). En 2002, Zhang et al. [26] llevaron a cabo un análisis estadístico para las sobrecargas con el objetivo de recomendar un valor adecuado para la fase de construcción. Por su parte, Peng et al. [27], en el año 2007, investigaron la distribución espacial, forma y dependencia en el tiempo de las cargas sobre un sistema de apuntalamiento con diferentes configuraciones. En el 2011, Zhao et al. [28] estudiaron las variaciones

registradas en la carga muerta y recomendaron valores estándar para las sobrecargas. Xi et al. [29–31], entre los años 2011 y 2015, midieron las cargas del sistema de apuntalamiento durante la construcción de edificios y propusieron métodos estadísticos para la determinación y consideración de cargas permanentes y sobrecargas. En el año 2016, Zhang et al. [32] midieron las cargas en puntales durante la construcción de tres edificios, determinando y caracterizando estadísticamente la magnitud de las cargas que reciben los puntales durante y después del hormigonado.

A pesar del esfuerzo realizado en todos estos estudios, las normativas más importantes a nivel internacional [33–36] han establecido tradicionalmente, pero también a día de hoy, criterios muy dispares en cuanto a: a) la magnitud de las sobrecargas durante la construcción, y b) los factores de carga de la carga permanente y las sobrecargas. Viendo esta disparidad de criterios, la importancia de la magnitud de las cargas de diseño, así como la cantidad de fallos y colapsos ocurridos, muchos autores han estudiado la fiabilidad y la seguridad de las estructuras de edificios durante la construcción. Webster [37], en el año 1980, presentó una metodología para determinar la fiabilidad de estructuras de edificios con forjados de losa maciza durante la construcción. Unos años más tarde, en 1987, Ellingwood [38] estudió los efectos de los errores en las fases de diseño y construcción en la fiabilidad de las estructuras de edificios durante la construcción. En 1992, Mosallam & Chen [39] aplicaron un método analítico para comprobar el adecuado comportamiento de los forjados y los puntales durante la construcción. En los años 2002 y 2004, Epaarachchi et al. [3,40] desarrollaron un modelo probabilístico para estimar la probabilidad de colapso durante la construcción de estructuras de edificios bajo un elevado número de variables (número de plantas consecutivas cimbradas, ciclo constructivo, mano de obra, calidad del hormigón, número de plantas del edificio y errores humanos). También en el 2004, Fang et al. [41] desarrollaron un método para calcular la probabilidad de fallo de una estructura de edificio durante su construcción, basándose en modelos anteriores y en simulaciones Monte Carlo. Más tarde, en 2011, Yuan & Jin [42] desarrollaron un modelo para el análisis de la fiabilidad de estructuras de edificios durante su construcción, teniendo en cuenta que el sistema de apuntalamiento es un sistema de soporte dependiente del tiempo y también afectado por los errores humanos. Un año después, Zhang et al. [43] realizaron otro análisis de fiabilidad de estructuras de edificios durante su construcción en el que utilizaron los datos de las cargas en puntales publicados. En el 2013, Rubio-Romero et al. [44] presentaron un análisis de las condiciones de seguridad de cimbras durante la construcción de 105 edificios. Ya en el año 2016, Zhang et al. [32] evaluaron la fiabilidad de estructuras temporales de apuntalamiento diseñadas mediante la metodología de la carga admisible y la metodología de los estados límites, y propusieron una combinación de cargas mejorada para las cargas permanentes y sobrecargas durante la construcción.

Recientemente, Buitrago et al. [12,13,45] y Di Palma [46] han destacado la importancia de la seguridad durante la construcción y cómo podría mejorarse.

Conocer la magnitud y distribución espacial de las cargas en el diseño de la estructura permanente y la estructura temporal (cimbra) es tan importante como estimar de forma correcta la transmisión de cargas entre los forjados conectados por puntales. La transmisión de cargas entre forjados y puntales depende de muchas variables (geometría y propiedades mecánicas de las estructuras permanente y temporal dependientes del tiempo). Muchos autores han centrado sus estudios en conocer cómo se produce esta transmisión de cargas entre forjados y puntales, ya que se considera un aspecto crucial para el correcto diseño tanto de la estructura permanente como de la estructura temporal. La recopilación aquí llevada a cabo trata a continuación y en mayor profundidad estos aspectos, separando los trabajos llevados a cabo en: a) métodos de cálculo para estimar la transmisión de cargas entre forjados y puntales durante la construcción de estructuras de edificios de hormigón armado, b) estudios experimentales y c) estudios numéricos. La Fig. 2.12 muestra la distribución regional de las investigaciones llevadas a cabo en este ámbito desde el año 1952. Los países de los grupos de investigación responsables de estas publicaciones son: Australia, Brasil, Canadá, China, Corea del Sur, EEUU, España, Portugal, Suecia y UK. En todos estos países se han llevado a cabo investigaciones que se tradujeron en artículos publicados. La Fig. 2.12 muestra precisamente el número de artículos publicados en revistas indexadas realizados en cada uno de los países.



Fig. 2.12. Distribución regional de las investigaciones sobre la transmisión de cargas entre forjados y puntales durante la construcción de estructuras de edificios. Año de la primera publicación recopilada: 1952.

Por su parte, la Fig. 2.13 muestra la evolución de los artículos publicados. Puede observarse cómo el interés sobre la materia (pendiente de la curva) ha ido aumentando desde mediados del siglo XX hasta la actualidad.

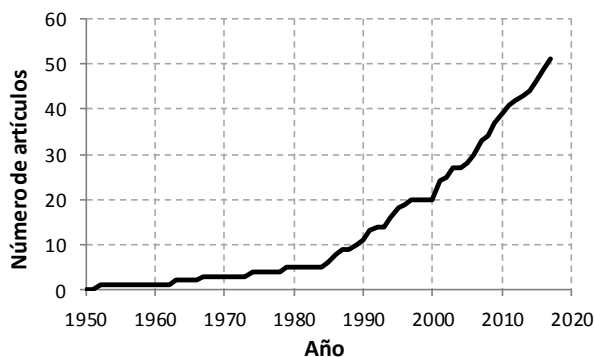


Fig. 2.13. Número acumulado de artículos publicados en revistas indexadas de alto impacto.

2.3.2. Métodos de cálculo para estimar la transmisión de carga entre forjados y puntales durante la construcción de estructuras de edificios de hormigón armado

Hasta la fecha, se han formulado diversas propuestas de cálculo para estimar la transmisión de cargas entre forjados y puntales durante la construcción de estructuras de edificios de hormigón armado. Los primeros estudios teóricos fueron llevados a cabo por Nielsen [47] en 1952 y por Grundy & Kabaila [48] en 1963, desarrollando metodologías simplificadas para el diseño del proceso constructivo de estructuras de edificios mediante el cimbrado de plantas sucesivas. El método de Grundy & Kabaila [48] tuvo una gran repercusión, convirtiéndose en el método más utilizado desde su aparición, dada su rápida y sencilla aplicación. Las bases del método tomaban como hipótesis más importante la rigidez infinita del sistema de apuntalamiento. Posteriormente, otros de autores [6,49–56] han demostrado que esta última hipótesis conduce a sobrevalorar las cargas en puntales e infravalorar las cargas que reciben los forjados durante las distintas fases de construcción del edificio. En 1967, Taylor [57] extrapoló el método de Grundy & Kabaila para el caso del recimbrado.

No fue hasta el año 1986 cuando Liu et al. [58] propusieron un método que contemplaba: a) los puntales como elementos de rigidez finita, b) distintas condiciones de contorno en los forjados (vanos interiores, de medianera o de esquina), c) rigidez de los forjados dependiente del tiempo, y d) pilares indeformables. En este mismo año, Aguinaga & Bazant [59] desarrollaron un nuevo método teniendo en cuenta el fenómeno de la fluencia en el hormigón. Más tarde, en 1991, Mosallam & Chen [51] propusieron otro método en el que la transmisión de cargas entre forjados y puntales se calculaba dos veces por operación, al inicio y al

final de cada fase constructiva, dada la dependencia de la rigidez de los forjados en el tiempo. Un año después, El-Shahhat & Chen [60] propusieron un método que realizaba el análisis en dos partes: a) empleando el método de Liu et al. para las fases de hormigonado, y b) planteando, para las fases de recimbrado o descimbrado, la compatibilidad de desplazamientos entre forjados y puntales para así determinar la carga transmitida de un elemento a otro.

En 1995, Duan & Chen [52] desarrollaron un método mejorado y más complejo, capaz de realizar un análisis unidimensional de cada vano del edificio con las siguientes hipótesis: a) existe compatibilidad de desplazamientos entre forjados y puntales, b) los puntales son elementos de rigidez finita, c) la rigidez de los forjados varía en el tiempo, d) el modelo es incremental, es decir, tiene en cuenta la construcción por fases considerando la acumulación de cargas y desplazamientos, y e) la deformabilidad de los forjados se modifica a través de un factor que considera las diferentes condiciones de contorno.

En el año 2001, Beeby [54] planteó dos metodologías simplificadas para obtener la transmisión de cargas entre forjados y puntales: a) tomando directamente el valor de la carga propuesta por el autor para forjados y puntales en función del proceso constructivo, o b) con un nuevo método de cálculo para obtener la carga del sistema de apuntalamiento, basado en el método simplificado de Grundy & Kabaila pero considerando puntales de rigidez finita y la rigidez de los forjados dependiente del tiempo. También en el año 2001, Fang et al. [61] desarrollaron un método que consideraba una estructura bidimensional dependiente del tiempo con forjados conectados por los puntales. Consideraron, como hipótesis adicional a las consideradas por Duan & Chen [52], la variación de la rigidez de los forjados durante el curado del hormigón, redistribuyendo los esfuerzos especialmente en forjados recién hormigonados. Fang et al. [62] realizaron una reformulación de su método en el año 2009 para trabajar con un método unidimensional. En el año 2003, Prado et al. [63] propusieron un nuevo método similar al de Duan & Chen, aunque más simplificado, para analizar la distribución de cargas entre forjados y puntales. Kajewski [64], en el año 2005, presentó una modificación del método simplificado de Grundy & Kabaila para tener en cuenta la construcción de forjados postesados. Park et al. [65], en el año 2011, desarrollaron un modelo tipo pórtico considerando la rigidez real de los puntales, diferentes condiciones de contorno y la fisuración del hormigón.

Por último, en el año 2011, Calderón et al. [6] desarrollaron un nuevo método que considera, además de las hipótesis del método de Duan & Chen, las siguientes hipótesis: a) la deformación media de los forjados coincide con la deformación media de los puntales, y b) la deformabilidad de los forjados considerando las distintas condiciones de contorno (vanos interiores, de medianera y de esquina) se evalúa a través del “Equivalent Frame Method” definido por Scanlon & Murray [66]. Entre muchas otras aplicaciones, este método ha sido utilizado para la obtención de

procesos constructivos óptimos [67,68]. Recientemente, Buitrago et al. [7,8], han publicado dos reformulaciones distintas del método de Calderón et al. La primera [7] es la más sencilla y permite evaluar, además de la transmisión de cargas entre forjados y puntales, la carga del puntal que está situado en el punto de mayor deformación del forjado. La segunda [8] permite adicionalmente, y por primera vez mediante métodos simplificados de cálculo, evaluar la carga de cada uno de los puntales en cada operación constructiva. La Tabla 2.1 muestra un resumen de todas las propuestas de cálculo formuladas hasta la fecha.

Tabla 2.1. Métodos.

Referencias	Año	País
Nielsen [47]	1952	Suecia
Grundy & Kabaila [48]	1963	Australia
Taylor [57]	1967	Australia
Liu et al. [58]	1986	EEUU
Aguinaga & Bazant [59]	1986	España-EEUU
Mosallam & Chen [51]	1991	EEUU
El-Shahhat & Chen [60]	1992	EEUU
Duan & Chen [52]	1995	EEUU
Beeby [54]	2001	UK
Fang et al. [61]	2001	China
Prado et al. [63]	2003	Brasil
Kajewski [64]	2005	Australia
Fang et al. [62]	2009	China
Park et al. [65]	2011	Corea del Sur
Calderón et al. [6]	2011	España
Buitrago et al. [7]	2016	España
Buitrago et al. [8]	2016	España

2.3.3. Estudios experimentales

El primero de los estudios experimentales fue llevado a cabo por Agarwal & Gardner [69] en 1974, donde instrumentaron dos edificios durante su construcción con el objetivo de observar cómo se transmitían las cargas entre los forjados y los puntales. Las desviaciones encontradas entre las cargas medidas y las cargas estimadas mediante el método simplificado de Grundy & Kabaila [48] fueron reducidas en los dos casos concretos estudiados.

En 1979, las medidas experimentales realizadas por Lasisi & Ng [70] en las plantas 7 a 11 de un edificio sirvieron también para comprobar la validez del método de Grundy & Kabaila. Los resultados mostraron una serie de desviaciones que, según Lasisi & Ng, debían ser corregidas mediante una pequeña modificación del método

simplificado, considerando las sobrecargas de construcción durante la fase de hormigonado.

Es generalmente conocido que el hormigón va adquiriendo resistencia y sus propiedades mecánicas van evolucionando durante el curado. Aplicando esta circunstancia a la construcción de estructuras de edificios, Ambrose et al. [71] evaluaron en 1994 qué ocurre con la distribución de cargas entre forjado y cimbra durante el proceso de curado del hormigón. Se instrumentaron algunos puntales bajo un forjado recién hormigonado para medir las cargas de los puntales durante 72 horas. La carga de los puntales descendió durante el transcurso del tiempo de medida demostrando que el forjado asume un porcentaje mayor de carga a medida que va adquiriendo mayor rigidez. En el mismo año, Moragues et al. [72] instrumentaron los puntales de dos edificios para estudiar la transmisión de cargas entre forjados y puntales considerando, por primera vez, procesos constructivos con clareado. Los resultados mostraron que: a) la carga máxima en puntales se produce en la planta baja cuando está el máximo número de plantas cimbradas hasta la cimentación; b) la carga máxima en forjados se encuentra en el último forjado que fue cimbrado hasta la cimentación, cuando existe el máximo número de plantas cimbradas en la parte superior de este forjado; y c) los valores estimados por el método de Grundy & Kabila estaban muy alejados a los medidos experimentalmente, desaconsejando el uso de este método para, al menos, los procesos con clareado.

En 1997, Rosowsky et al. [73] realizaron un completo estudio de la transmisión de cargas con la monitorización de puntales en vanos geoméricamente distintos. La carga medida en los puntales presentó una variación cíclica con una tendencia decreciente en el tiempo. Estas variaciones demostraron que: a) las cargas de los forjados y puntales están altamente influenciadas por las condiciones meteorológicas, y b) el hormigón de los forjados adquiere rigidez con el tiempo, descargando así los puntales.

Beeby [54,74], en el año 2001, realizó una extensa campaña de medidas en puntales durante la construcción de un edificio de 7 plantas. La comparación de las cargas medidas en puntales con las estimadas mediante el método simplificado de Grundy & Kabaila permitió demostrar que este método simplificado sobreestimaba las cargas en puntales. Tomando como base su estudio experimental, Beeby propuso la nueva metodología presentada en el apartado anterior. En el mismo año, Fang et al. [55] realizaron un amplio estudio experimental durante la construcción de un edificio. Los resultados medidos en comparación con las cargas estimadas mediante el método simplificado de Grundy & Kabaila mostraron desviaciones muy elevadas, de hasta un 27%. Según los autores, la formulación de un nuevo método de cálculo (Fang et al. [61]) redujo estas desviaciones a valores inferiores al 5%. En este estudio también se confirmó que: a) durante el curado del hormigón existe una tendencia decreciente de las cargas de los puntales bajo un forjado recién hormigonado, y b) la variación de estas cargas es cíclica debido a la influencia de la temperatura.

En el año 2003, Vollum [75] comparó las cargas medidas en puntales en dos edificios con las estimaciones realizadas mediante un modelo de elementos finitos y las predicciones realizadas por Beeby. Para tener en cuenta la fisuración de los forjados durante la construcción, Vollum recomendó una reducción del módulo de elasticidad del hormigón en la estimación de las cargas en puntales.

Puente et al. [76], en el 2007, instrumentaron los puntales de dos edificios para estudiar cómo se produce la transmisión de cargas entre forjados y puntales de plantas sucesivas apuntaladas. La comparación de las medidas experimentales con las estimadas mediante distintos métodos simplificados de cálculo sirvió para establecer qué métodos son los que mejores predicciones realizaban. En este mismo año, Azkune et al. [77] analizaron la influencia de la temperatura en la transmisión de cargas entre forjados y puntales obteniendo variaciones de hasta 3.0kN en la carga de un puntal. En el año 2010, los mismos autores [78] estudiaron de forma experimental las posibles sobrecargas en puntales durante el descimbrado.

En 2009, Alvarado et al. [56,79] construyeron un edificio de tres plantas con fines exclusivamente experimentales. De este ensayo se obtuvieron multitud de datos que han servido, y todavía se sigue aprovechando, para realizar otros estudios. El ensayo sirvió para estudiar en profundidad una de las técnicas de construcción más empleadas en España y exportada a nivel mundial, como es el clareado. Los autores aprovecharon también este experimento, que se hizo bajo condiciones muy controladas, para el desarrollo de un nuevo método simplificado de cálculo [6] (Véase Calderón et al. en el apartado anterior). Este método simplificado es uno de los más recientes, y de los que mejor ajuste presenta a las medidas experimentales [67,80–82].

En el año 2011, Park et al. [65] midieron las cargas en puntales de un edificio durante su construcción. Estas medidas fueron tomadas con el objetivo de ajustar y validar el correcto funcionamiento del método simplificado propuesto por estos autores.

Gasch et al. [80–83], en el año 2012, realizaron medidas en puntales en condiciones reales durante la construcción de tres edificios. Cada uno de los edificios presentaba diferentes tipos de forjados: losa maciza y reticulares de casetón perdido y de casetón recuperable. Con este amplio estudio experimental se pudieron extrapolar las conclusiones alcanzadas por Alvarado et al. [56,79] a casos reales, y comprobar que el método simplificado que mejor se ajusta a las medidas experimentales era el método propuesto por Calderón et al. [6]. Además, los resultados obtenidos mostraron que la temperatura ambiente afecta de forma significativa a la transmisión de cargas entre forjados y puntales [83]. La afección de la temperatura a la transmisión de carga entre forjados y puntales se debió a: a) cambios uniformes en la temperatura, con una clara componente cíclica entre el día y la noche, y b) una gran influencia de los gradientes de temperatura registrados a diferentes profundidades de las secciones de los forjados, provocando descensos o subidas de

los forjados (alabeo) en función del signo del gradiente, y afectando consecuentemente a la transmisión de cargas entre forjados y puntales.

En el año 2014, Huang & Liu [84] estudiaron el efecto de la variación de la temperatura entre el día y la noche con la medición continua de la carga de los puntales y la temperatura ambiente. Los resultados obtenidos sirvieron para desarrollar nuevos modelos estructurales de estructuras de edificios durante la construcción, y desarrollar un nuevo software para el análisis de la seguridad durante la construcción considerando los efectos de la temperatura.

Por último, Zhang et al. [32,85], en 2016, instrumentaron puntales bajo forjados recién hormigonados en tres edificios distintos. Confirmaron que, durante el curado del hormigón, la carga de los puntales desciende debido al aumento en la rigidez de los forjados. También registraron un pico de carga en los puntales en el momento del hormigonado, correspondiente a la sobrecarga de hormigonado. Como principal conclusión del estudio experimental obtuvieron que las cargas durante la construcción son de índole distinta a las cargas de servicio y, por tanto, deben ser consideradas de diferente forma en fase de diseño. Como se ha comentado anteriormente (Apartado 2.3.1), Zhang et al. propusieron una nueva combinación de cargas en construcción para contemplar estas diferencias. La Tabla 2.2 muestra un resumen de los estudios experimentales llevados a cabo hasta la fecha.

Tabla 2.2. Estudios experimentales.

Referencias	Año	País
Agarwal & Gardner [69]	1974	Canadá
Lasisi & Ng [70]	1979	Canadá
Ambrose et al. [71]	1994	EEUU
Moragues et al. [72]	1994	España
Rosowsky et al. [73]	1997	EEUU
Beeby [54,74]	2001	UK
Fang et al. [55]	2001	China
Vollum et al. [75,86]	2002-2003	UK
Puente et al. [76]	2007	España
Azkune et al. [77,78]	2007-2010	España
Alvarado et al. [56,79]	2009	España
Park et al. [65]	2011	Corea del Sur
Gasch et al. [80–83]	2012-2015	España
Huang & Liu [84]	2014	China
Zhang et al. [32,85]	2016	Australia

2.3.4. Estudios numéricos

Los estudios numéricos más avanzados no empezaron a desarrollarse hasta finales de la década de los 80. Hasta entonces, los métodos simplificados de cálculo propuestos proporcionaban estimaciones que fueron consideradas como bastante próximas a la realidad. Sin embargo, los primeros estudios experimentales demostraron que la transmisión de cargas entre forjados y puntales es un problema complejo y debía ser analizado con más detalle. Los estudios numéricos llevados a cabo hasta la fecha se han separado en: a) aquellos en los que se estudió la transmisión de cargas entre forjados y puntales sin considerar los efectos de la temperatura, fluencia o retracción, b) aquellos en los que se consideran los efectos de fluencia y retracción, y c) aquellos en los que se considera los efectos de la temperatura. La Tabla 2.3 muestra una recopilación de los estudios numéricos llevados a cabo.

Tabla 2.3. Estudios numéricos.

Referencias (Transmisión de cargas)	Año	País
Liu et al. [49,87]	1985-1989	China-EEUU
Stivaros & Halvorsen [50]	1990	EEUU
Moragues et al. [53]	1996	España
Kajewski [64]	2005	Australia
Kwak & Kim [88]	2006	Corea
Díaz [89]	2008	España
Alvarado et al. [79,90]	2009-2010	España
Gasch et al. [80–82]	2012-2015	España
Buitrago et al. [45]	2015	España
Adam et al. [91]	2017	España
Referencias (Efecto de la retracción y fluencia)	Año	País
Aguinaga & Bazant [59]	1986	España-EEUU
Liu & Chen [92]	1987	China-EEUU
Mosallam & Chen [51]	1991	EEUU
Lee et al. [93]	1991	China-EEUU
Duan & Chen [94]	1995	EEUU
Kwak & Kim [95]	2006	Corea
Xi et al. [96]	2007	China
Fang et al. [97]	2009	China
Referencias (Efecto de la temperatura)	Año	País
Fang et al. [97]	2009	China
Gasch et al. [83]	2012	España
Huang & Liu [84]	2014	China
Simavorian et al. [98]	2017	Portugal

2.3.4.1. Transmisión de cargas sin considerar la temperatura, la retracción o la fluencia

A finales de la década de los 80, Liu et al. [49,87] desarrollaron un modelo numérico en tres dimensiones con las siguientes hipótesis: a) comportamiento elástico de los puntales y de los forjados, b) rigidez de los forjados dependiente del tiempo, c) diferentes condiciones de contorno para los vanos (continua en todas las direcciones, continua en una sola dirección y aislado), d) pilares indeformables, y e) cimentación infinitamente rígida. Los resultados obtenidos demostraron que el método simplificado de Grundy & Kabaila es adecuado para predecir las cargas en el proceso de construcción, aunque un factor corrector entre 1.05 y 1.10 podría ser utilizado para corregir los resultados de este método simplificado del lado de la seguridad.

Más tarde, en 1990, Stivaros & Halvorsen [50] propusieron el uso del “Equivalent Frame Method” (EFM) para el cálculo de la transmisión de cargas entre forjados y puntales mediante un modelo en 2D. Las hipótesis del modelo fueron: a) puntales con comportamiento elástico, b) la conexión entre la losa y el puntal es una articulación, c) cimentación infinitamente rígida, d) distintas condiciones de contorno (vano aislado y conjunto de tres vanos), y e) losas y columnas consideradas como elementos tipo viga. Los resultados mostraron diferencias superiores al 5% respecto a los resultados obtenidos mediante los métodos simplificados de Grundy & Kabaila y Liu et al. También resultaba importante y necesario, según los autores, considerar las condiciones de contorno en el cálculo para no incurrir en errores importantes.

Un año más tarde, Mosallam & Chen [51] desarrollaron un modelo en 2D con el que se pretendía comparar los resultados obtenidos del modelo de Liu et al. con el de Grundy & Kabaila. En líneas generales, el modelo es similar al empleado por Liu et al. y considera adicionalmente la posible deformación vertical de los pilares. Los resultados obtenidos demostraron que: a) la rigidez de la cimentación apenas afecta a la carga sobre los forjados, pero sí resulta importante para la carga de los puntales, b) las condiciones de contorno del forjado tienen poca influencia en las cargas de los forjados pero no en el valor de carga máxima en puntales, c) la influencia de la rigidez de los forjados es reducida, d) considerar la rigidez real de los puntales tiene una gran incidencia en la carga que reciben, y e) la evolución de las propiedades mecánicas del hormigón incide de forma significativa en la distribución de cargas entre forjados y puntales.

Posteriormente, en 1996, y tras realizar un extenso estudio experimental de la transmisión de cargas entre forjados y puntales, Moragues et al. [53] desarrollaron un modelo numérico en 2D. Los resultados confirmaron las conclusiones obtenidas del estudio experimental y evidenciaron: a) el método simplificado de Grundy & Kabaila no es adecuado para el caso de procesos constructivos con clareado, y b) necesidad de analizar las deformaciones producidas durante el proceso constructivo,

la posible fisuración del hormigón joven y la influencia que pueden tener las deformaciones de retracción y térmicas durante el proceso constructivo.

Kajewski [64], en 2005, realizó una modelización mediante el método de los elementos finitos para estudiar la transmisión de cargas entre diferentes forjados postesados y conectados por la cimbra. Los resultados mostraron el nivel de carga que los forjados reciben tras el postesado, descargando entonces los puntales bajo el mismo forjado en la misma proporción. En 2006, Kwak & Kim [88] desarrollaron un modelo numérico para simular el comportamiento, dependiente del tiempo, de una estructura de hormigón armado teniendo en cuenta el proceso constructivo. Este modelo numérico tuvo en cuenta: a) las no linealidades geométricas y del material (fisuración y plastificación de la armadura) y b) la variación de las propiedades mecánicas del hormigón en el tiempo. Kwak & Kim utilizaron un modelo 2D, similar al empleado por Liu et al., pero considerando también la rigidez real de los pilares y diferentes tipos de procesos constructivos. Los autores concluyeron que, si no se considera la evolución de las propiedades mecánicas del hormigón, los resultados son conservadores para las cargas de los forjados y del lado de la inseguridad para las cargas de los puntales.

En el año 2008, Díaz [89] estudió la influencia de distintos parámetros en la transmisión de cargas entre forjados y puntales con un modelo en SAP2000 [99]. También estudió la edad mínima de descimbrado de los forjados. De forma adicional a las hipótesis tratadas con anterioridad para los diferentes modelos, Díaz consideró que todas las plantas de hormigón tienen el mismo módulo de deformación, excepto la recién hormigonada, cuyo módulo se consideró nulo. Entre otras conclusiones, Díaz argumentó que los puntales deben ser retirados desde el centro de vano hacia los pilares con el objetivo de evitar fallos imprevistos.

Alvarado et al. [79,90], en 2009, desarrollaron un modelo numérico en 3D mediante el método de los elementos finitos. En este modelo se incluye un cálculo evolutivo para considerar la evolución de las propiedades del hormigón con el tiempo. Las hipótesis consideradas fueron: a) comportamiento elástico y lineal de forjados, pilares, puntales, tableros de encofrado y sopandas, b) rigidez de los forjados y pilares dependiente del tiempo, c) rigidez real (finita) de los puntales, tableros de encofrado y sopandas, y d) cimentación infinitamente rígida. Este modelo numérico fue validado, mostrando resultados muy cercanos a los valores experimentales. Por lo tanto, la simulación en 3D por el método de los elementos finitos fue adecuada para simular los procesos constructivos de estructuras de edificios durante su construcción.

Por su parte, Gasch et al. [80–82] en el año 2012, siguiendo la misma modelización que Alvarado et al., simularon la construcción de tres estructuras de edificios con el método de los elementos finitos. Fueron analizados edificios reales con diferentes tipologías de forjados: losa maciza [82], reticular con casetón perdido [81] y reticular con casetón recuperable [80]. Los resultados confirmaron que el método de

elementos finitos presenta resultados muy ajustados a las medidas experimentales en todos los casos estudiados.

En el año 2015, Buitrago et al. [45] introdujeron el concepto de limitador de carga en puntales. El limitador de carga nace de la necesidad de reducir los problemas de seguridad registrados durante la construcción de edificios [12,13]. En el Capítulo 3 de esta tesis doctoral se profundiza en el estudio realizado.

Por último, en el año 2017, Adam et al. [91] estudiaron mediante el método de los elementos finitos las limitaciones del método de Grundy & Kabaila. La metodología empleada para la simulación numérica empleó como base la anteriormente desarrollada por Alvarado et al. Los resultados mostraron las limitaciones del método de Grundy & Kabaila, acotando su uso a tan solo procesos con recimbrado (CRD) de uno o más puntales por cada 1.2m^2 de área tributaria. Su aplicación a procesos constructivos sin operación intermedia (CD) o con clareado (CCD) quedó totalmente desaconsejada.

2.3.4.2. Efecto de la retracción y la fluencia en la transmisión de cargas

Adicionalmente a los estudios numéricos presentados, algunos autores estudiaron numéricamente los efectos de la fluencia y la retracción en la transmisión de cargas entre forjados y puntales durante la construcción de estructuras de edificios. Los estudios llevados a cabo por Aguinaga & Bazant [59], Liu & Chen [92], Mosallam & Chen [51], Lee et al. [93], Duan & Chen [94], Kwak & Kim [95], Xi et al. [96] y Fang et al. [97], alcanzaron conclusiones similares: los efectos de la fluencia y la retracción del hormigón en la transmisión de cargas entre forjados y puntales son despreciables. El nivel de carga de los forjados y de los puntales son similares con o sin considerar estos efectos.

Aunque el efecto de la fluencia y la retracción en la transmisión de cargas es despreciable, los diferentes autores también están de acuerdo con la elevada influencia de ambos efectos en la flecha a largo plazo, ya que la flecha a largo plazo de hormigones jóvenes cargados durante la construcción de un edificio es varias veces superior a la flecha elástica. Otros autores que investigaron las consecuencias en las flechas a largo plazo de los hormigones jóvenes cargados durante la construcción (Vollum et al. [86], Hossain et al. [100,101], Kang et al. [102], Hwang et al. [103] y Alvarado et al. [104,105]) confirmaron las conclusiones alcanzadas, destacando la importancia de reducir la fisuración y la carga que reciben los forjados durante la construcción.

2.3.4.3. Efecto de la temperatura en la transmisión de cargas

Otros autores también estudiaron minuciosamente el efecto de la temperatura en la transmisión de cargas entre forjados y puntales. En el año 2009, Fang et al. [97] estudiaron las fluctuaciones de la carga de los forjados y los puntales debidas a las

variaciones de la temperatura entre el día y la noche. Según las conclusiones obtenidas, este efecto puede llegar a modificar la carga de forjados y puntales hasta en un 32%.

En el año 2012, Gasch et al. [83] estudiaron por el método de los elementos finitos el efecto de la temperatura ambiente sobre los forjados. Se consideraron tanto las variaciones uniformes de la temperatura ambiente (entre el día y la noche) como, por primera vez, los gradientes de temperatura registrados a distintas profundidades del espesor de los forjados durante la construcción de los edificios reales monitorizados. La simulación permitió estudiar correctamente cómo afecta la temperatura a esta transmisión de cargas, entender las razones por las que ocurre y cuáles son sus consecuencias. El gradiente de temperatura medido a distintas profundidades de los forjados provoca el descenso o ascenso (alabeo) de los forjados, cargando y descargando los puntales respectivamente. Para gradientes de temperatura de tan solo 1°C, la carga de los puntales puede variar entre un 2% y un 6% del peso propio de los forjados. Experimentalmente se registraron gradientes de hasta 10°C pudiendo suponer, por tanto, variaciones de la carga entre un 20% y un 60% del peso propio del forjado.

Huang & Liu [84], en 2014, desarrollaron nuevos modelos numéricos y un nuevo software para considerar el efecto de la temperatura ambiente, con sus respectivas variaciones entre el día y la noche, en la transmisión de cargas entre forjados y puntales. Por su parte, Simovarian et al. [98], en el año 2017, realizaron análisis termo-mecánicos para estudiar la influencia de la temperatura, entre otros parámetros, en la distribución de tensiones y deformaciones en losas macizas durante la construcción.

2.4. Antecedentes al limitador de carga en puntales en la literatura

El desarrollo de los limitadores de carga realizado en esta tesis doctoral presenta escasos antecedentes que, aunque están alejados del desarrollo propuesto, ilustran de forma correcta el estado de la técnica de forma general. Por un lado, ALPHI presentó un nuevo elemento en el año 2012 (Número de patente EP2511449A1) que limita la carga de los puntales por debajo del valor de diseño de dicho elemento. Por otro lado, las empresas Encofrados J. Alsina (2006) y ULMA (2008) presentaron el desarrollo de nuevos elementos que ayudan al rápido descimbrado de los puntales (Número de patente ES2294874A1 y ES2366967T3 respectivamente).

2.4.1. Limitación de la carga de los puntales (ALPHI EP2511449A1)

El desarrollo realizado por ALPHI presenta dos variantes (Véase Fig. 2.14). Se tratan de elementos mecánicos instalados entre la rosca y el pasador de un puntal que se rompen al alcanzar la carga límite. En ambos casos, si un puntal recibe una carga

mayor que la carga límite de diseño de estos elementos, estos se rompen, se observa de forma sencilla su rotura, indican a los operarios que la carga axial del puntal ha superado la carga límite y evitan que se produzca la rotura de los puntales, con el objetivo de reutilizarlos posteriormente. En la primera variante (Fig. 2.14a), la rotura del elemento se produce mediante pandeo de los elementos verticales, mientras que en la segunda variante (Fig. 2.14b) se produce la rotura del manguito.

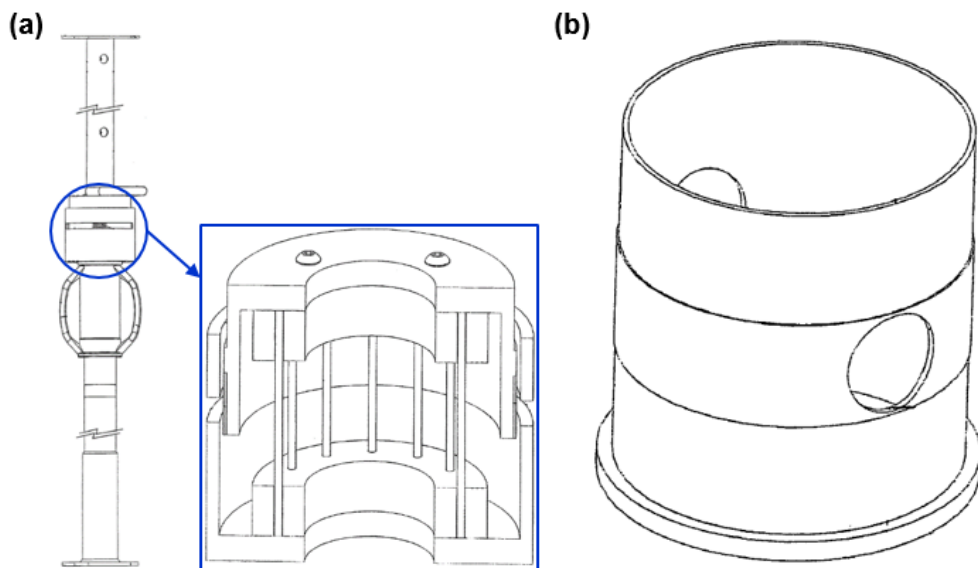


Fig. 2.14. Control de la carga límite propuesto por ALPHI (Patente EP2511449A1) mediante: (a) pandeo de los elementos verticales y (b) rotura del manguito.

Ambos modos de rotura pueden provocar consecuentemente la descarga repentina del puntal al alcanzar la carga límite. Por tanto, su modo de funcionamiento es similar al de un puntal, en el que el modo de rotura produce la descarga repentina del mismo y su nula contribución a seguir resistiendo las cargas axiales que estaba recibiendo. Consecuentemente, la seguridad durante la construcción no se mejora. Sin embargo, en el caso de instalar estos elementos desarrollados y alcanzar la carga límite, solo sería necesario sustituir dichos elementos, de menor coste, pudiéndose reutilizar el puntal posteriormente. Ambos inventos son, en definitiva, buenos indicadores de que los puntales han superado su carga admisible en algún momento de la construcción.

2.4.2. Rápido descimbrado de puntales (Alsina ES2294874A1 y ULMA ES2366967T3)

Los dos desarrollos tratados en este sub-apartado presentan un funcionamiento similar entre ellos. Ninguno de los dos es capaz de limitar la carga de un puntal. Su función consiste en proporcionar al operario una ayuda en el descimbrado de

puntales muy cargados. Durante el descimbrado, los operarios deben retirar los puntales que, en muchas ocasiones, presentan una carga elevada. La labor de retirada de dichos puntales con cargas elevadas requiere, a menudo, de un gran esfuerzo. Para solucionar este problema, las dos empresas (Alsina y ULMA) desarrollaron dos dispositivos (véase Fig. 2.15) que ayudan a los operarios a realizar una descarga rápida de los puntales sin un gran esfuerzo.

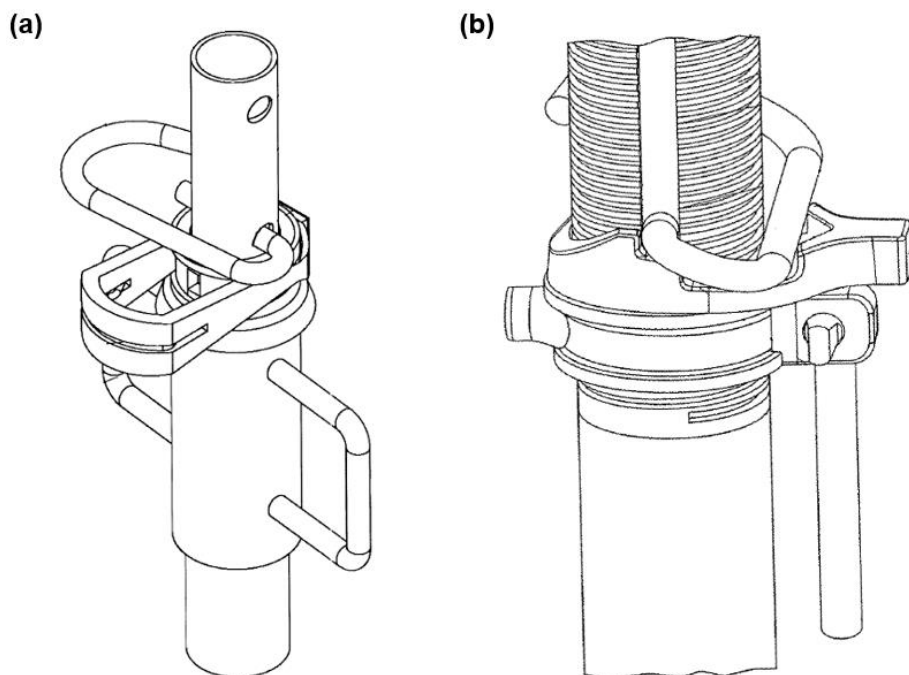


Fig. 2.15. Elementos para descarga repentina de puntales durante el descimbrado: (a) Alsina (Patente ES2294874A1) y b) ULMA (Patente ES2366967T3).

2.5. Conclusiones relativas al estado del arte

Este capítulo ha presentado una descripción de los diferentes sistemas de apuntalamiento y procesos constructivos existentes para la construcción de estructuras de edificios de hormigón armado. Además, se ha realizado una extensa recopilación sobre el estado del conocimiento acerca de la transmisión de cargas entre forjados y puntales durante la construcción de estructuras de edificios de hormigón armado. Se han recopilado todos los avances en temas de simulación y ensayos experimentales, así como los diferentes métodos de cálculo disponibles, con el objetivo de fomentar su aplicación práctica y mejorar la fase de construcción de estructuras de edificios. Tras más de 60 años de estudios realizados, la técnica y el conocimiento de los procesos constructivos de estructuras de edificios han mejorado sustancialmente y carece de sentido seguir aplicando actualmente técnicas de

mediados del siglo XX para resolver un problema de este tipo. Los estudios desarrollados recientemente han permitido el desarrollo de métodos de cálculo muy ajustados a las medidas experimentales y que, consecuentemente, deberían ser aplicados por las empresas constructoras, de encofrado y cimbras o las consultorías.

También se han presentado en este capítulo los antecedentes al desarrollo propuesto en esta tesis doctoral (limitador de carga). Aquellos desarrollos más próximos al limitador de carga aquí desarrollado se basan en:

- La limitación de la carga a través de la rotura de una pieza incorporada al puntal. La rotura de esta pieza evita la rotura del puntal, que puede ser entonces reutilizado, e indica que el puntal ha superado su carga admisible. Sin embargo, en caso de superar la carga admisible, el puntal queda igualmente inoperativo de forma repentina.
- Una ayuda al descimbrado rápido de puntales, mediante la descarga total de un puntal sin requerir un gran esfuerzo por parte del operario. Este dispositivo es de gran ayuda cuando los puntales están altamente cargados.

Ninguno de los desarrollos anteriormente propuestos mejora los graves problemas de seguridad, que se traducen en colapsos incluso de estructuras completas en algunos casos, y en graves problemas para las condiciones de servicio de la estructura y su durabilidad en otros. Como se ha comentado, estos problemas vienen ocasionados por diferentes causas, siendo las cargas en puntales superiores a la admisible la causa más común, y el colapso repentino de estos puntales el desencadenante de los problemas.

En este punto, y como solución a este problema, nace el limitador de carga desarrollado y validado en esta tesis doctoral. Además de mejorar la seguridad durante la construcción de estructuras, el limitador de carga presenta también una serie de ventajas objetivas (además de la seguridad, el posible menor coste del sistema de apuntalamiento y la mayor eficiencia estructural) que ningún desarrollo anterior presenta y que se irán analizando en profundidad a lo largo del documento.

CAPÍTULO 3. ESTUDIO DE LA VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE LOS LIMITADORES DE CARGA MEDIANTE SIMULACIÓN NUMÉRICA

3.1. Introducción

Los limitadores de carga instalados en los puntales limitan la carga de un puntal por debajo de su carga admisible. Además, deberían ser capaces de mantener la carga de un puntal por debajo de un valor límite escogido en el diseño del limitador. Mantener a los puntales operativos es un aspecto crucial por dos razones: 1) se evita su rotura, y 2) no se produce una descarga repentina que podría desencadenar problemas en las condiciones de servicio y durabilidad de la estructura, e incluso problemas en la seguridad estructural.

Por un lado, la elección del tipo y de la cantidad de puntales necesarios, así como del proceso constructivo más económico y ejecutado en condiciones totalmente seguras, requiere conocer con exactitud las cargas que reciben los puntales en cada caso concreto. Evidentemente, el uso de una cantidad menor de puntales en la construcción produce, además de un ahorro económico, un ahorro del material a utilizar y movilizar en obra. Sin embargo, la reducción en el número de puntales aumenta las cargas individuales de cada puntal, cuya resistencia viene limitada por su carga admisible. Consecuentemente, la reducción máxima del número de puntales viene limitada por la seguridad durante la construcción. No obstante, puede reducirse todavía más el número de puntales utilizados con el uso de limitadores de carga en puntales, que mantendrían a los puntales utilizados siempre por debajo de su carga admisible (a la carga límite correspondiente del limitador de carga). Esta solución, además de mejorar la seguridad durante la construcción al limitar la carga de los puntales por debajo de su carga admisible, también mejora los costes del sistema de apuntalamiento. Dichos costes todavía pueden ser mejorados con el uso de puntales de menor resistencia, más económicos que los puntales más robustos.

Actualmente, las empresas de encofrado y cimbras disponen de un catálogo reducido de puntales, aspecto que conlleva, en muchas ocasiones, a utilizar puntales con una carga admisible significativamente mayor que la necesaria. Con el uso de los limitadores de carga podrían utilizarse puntales más económicos, con carga admisible ligeramente inferior a la requerida, y con una limitación de la carga a la carga admisible de los puntales utilizados. En la Fig. 3.1 se muestran esquemáticamente las ventajas comentadas.

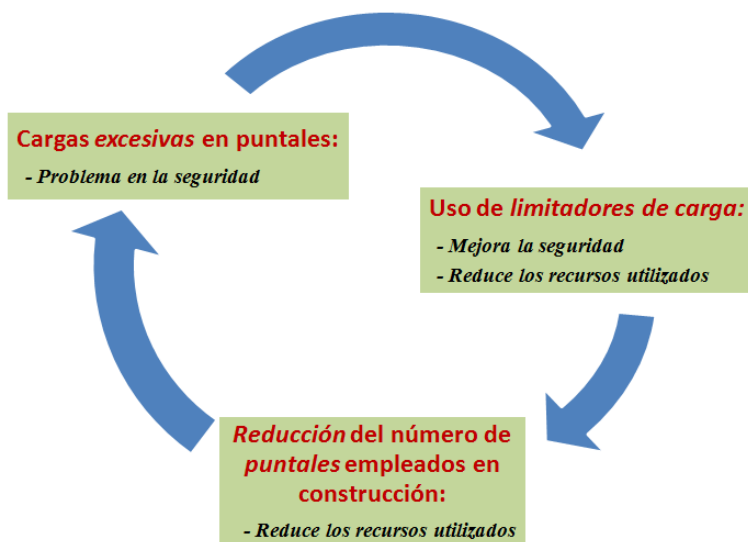


Fig. 3.1. Ventajas del uso de limitadores de carga en puntales.

Por otro lado, las investigaciones realizadas hasta el momento [56,79,80,90] demuestran que la distribución de cargas en puntales para una planta no es uniforme. Las cargas en los puntales son, en general, superiores en los puntos de mayor deformación de los forjados para cualquier operación constructiva. Las cargas de los diferentes puntales son extremadamente diferentes, presentando cargas casi nulas en los puntales más próximos a los pilares y cargas elevadas en los puntos de mayor deformación del vano de los forjados. Sin embargo, y por razones de sencillez constructiva y operatividad, se utiliza un mismo tipo de puntal para toda la planta, e incluso para la construcción de todo el edificio, con una carga admisible superior a la máxima carga esperada en cualquier punto de cualquier planta y para cualquier operación constructiva. El sistema de apuntalamiento presenta, por tanto, puntales sobredimensionados en: a) algunas zonas del sistema de apuntalamiento (zonas próximas a los pilares), y b) en todos aquellos momentos de la construcción donde la carga máxima del sistema de apuntalamiento es notablemente inferior a la carga máxima de diseño. En este punto es donde uno de los objetivos del limitador de carga consiste también en uniformizar las cargas que reciben los puntales, reduciendo las cargas máximas con un limitador de carga de una carga límite inferior a este valor, y redistribuyendo parte de la carga en exceso entre los forjados y los puntales vecinos que todavía pueden recibir más carga.

En este capítulo se presenta el estudio realizado mediante simulación numérica para demostrar la viabilidad técnico-económica del empleo de limitadores de carga en puntales. El contenido de este capítulo es un amplio resumen de un análisis exhaustivo realizado por el mismo autor de la tesis doctoral en trabajos anteriores [45,106]. Tras esta breve introducción, en el apartado 3.2 se presenta el estudio,

mediante simulación numérica, de la viabilidad técnica del uso de limitadores de carga aplicado al caso de la construcción de un edificio experimental. La simulación numérica de este edificio experimental está ampliamente validada con medidas experimentales en trabajos anteriores del grupo de investigación donde se engloba el desarrollo de esta tesis doctoral. Posteriormente, en el apartado 3.3 se realiza un estudio de la construcción de un edificio real, aplicando los limitadores de carga en puntales en modelos ya realizados con anterioridad por el grupo de investigación. En este punto se analiza tanto la viabilidad técnica como la económica del uso de limitadores de carga en puntales. Finalmente, en el apartado 3.3 se resumen las conclusiones derivadas del estudio de viabilidad planteado.

3.2. Estudio de la viabilidad técnica de los limitadores de carga aplicado a un edificio experimental

3.2.1. Descripción del edificio considerado para el estudio

El edificio considerado está constituido por 3 plantas, con forjados de losa maciza de hormigón armado de 0.25m de canto. La altura libre entre plantas es de 2.75m y los forjados se sostienen sobre cuatro pilares de sección rectangular, cuya separación es de 6.00m con un voladizo de 1.80m. El hormigón utilizado para la construcción de todos los elementos del edificio tiene una resistencia característica a compresión de 25MPa. La Fig. 3.2 muestra un esquema del edificio considerado.

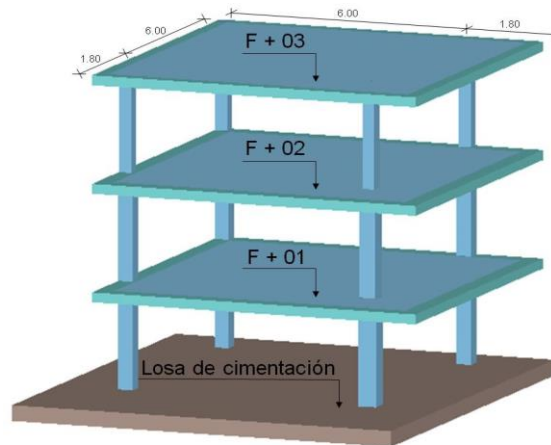


Fig. 3.2. Vista en 3D del edificio.

Para este caso de estudio, la construcción se modeliza mediante un proceso constructivo CCD (Cimbrado/Clareado/Descimbrado) siguiendo los tiempos y las pautas marcadas en la ejecución del edificio real. Este edificio fue construido con fines exclusivamente experimentales en trabajos anteriores del mismo grupo de

investigación [56,79] al que el autor de esta tesis doctoral pertenece, cuya simulación numérica realizada quedó totalmente validada con un elevado ajuste de los resultados obtenidos respecto a las medidas experimentales registradas. En esta ocasión se utiliza la misma simulación numérica llevada a cabo, para la que se introducen los limitadores de carga en los puntales con el objetivo de estudiar su viabilidad técnico-económica.

3.2.2. Modelo de elementos finitos

Para el modelo de elementos finitos (MEF) se empleó el software ANSYS [107] tomando como base las simulaciones realizadas en anteriores trabajos [79,90]. Se consideraron las características geométricas y mecánicas de cada uno de los elementos que intervienen en la construcción del edificio. Además, se tuvo en cuenta el proceso constructivo seguido mediante un cálculo evolutivo.

Las hipótesis adoptadas para realizar el MEF fueron:

- Comportamiento elástico y lineal del forjado y pilares de hormigón armado, considerando la variación de su rigidez en el tiempo.
- Los puntales de acero se consideraron como elementos elásticos con una rigidez finita, apoyados en sus extremos.
- Comportamiento elasto-plástico perfecto de los limitadores de carga en puntales. Para ello, el conjunto puntal-limitador de carga se comportará de forma elástica hasta que llegue a la tensión de plastificación o carga límite elegida, de forma que se pueda controlar la carga que recibe un puntal.
- Los tableros de encofrado y las sopandas se consideraron como elementos con un comportamiento elástico y lineal y de rigidez finita. Los tableros son de madera, con un espesor de 27mm y un módulo de elasticidad de 10GPa, mientras que las sopandas tienen una sección transversal de 406mm² y un módulo de elasticidad de 210GPa.
- La cimentación se consideró infinitamente rígida.
- No se consideraron los cambios de temperatura en los diferentes elementos de la estructura. Tampoco los efectos de la fluencia y la retracción.

Durante la simulación de la construcción del edificio, las condiciones de apoyo, geometría y características mecánicas del hormigón son variables en el tiempo. ANSYS [107] permite realizar un cálculo evolutivo a través de diferentes pasos de carga. Los pasos de carga adoptados en el MEF se corresponden con las diferentes fases constructivas. A continuación, en la Fig. 3.3 y la Fig. 3.4 se indican las fases correspondientes a cada paso de carga hasta el hormigonado del forjado 3. Además, en estas figuras se pueden observar los intervalos de tiempo entre las operaciones constructivas.

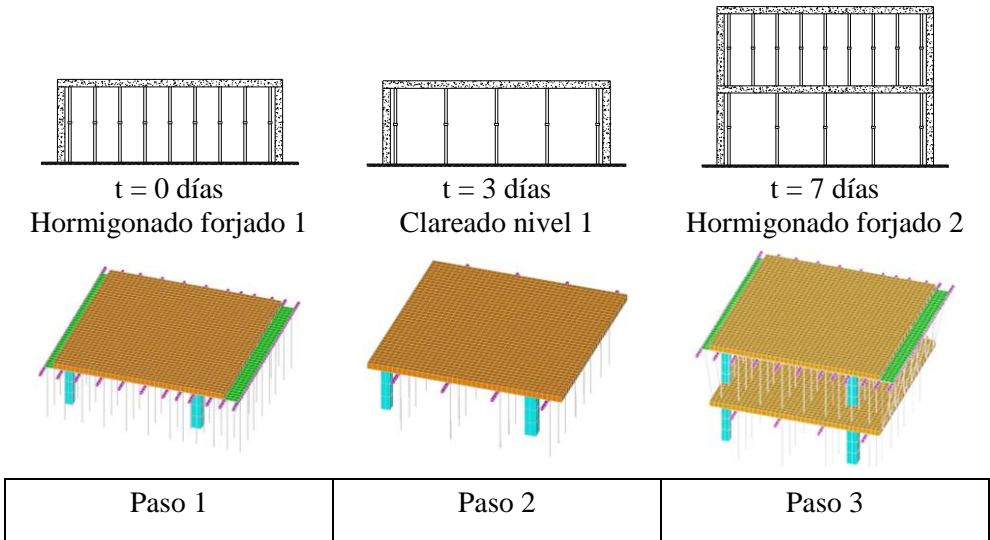


Fig. 3.3. Pasos de carga correspondientes a las diferentes operaciones constructivas (I).

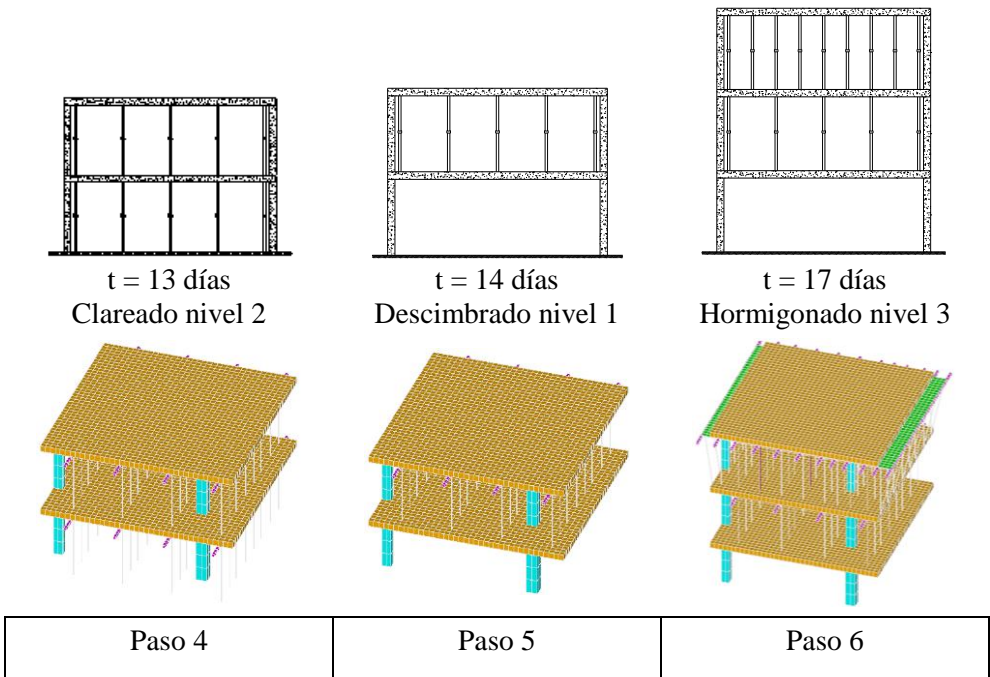


Fig. 3.4. Pasos de carga correspondientes a las diferentes operaciones constructivas (II).

3.2.3. Análisis paramétrico y resultados

Debido a la novedad que supone la nueva técnica constructiva empleando limitadores de carga, se realizó un análisis paramétrico para analizar cómo

interactúan algunos de los factores más importantes. Los parámetros considerados en el estudio fueron:

- La carga límite de los limitadores de carga. La carga máxima de diseño del sistema de apuntalamiento en este caso concreto superaba ligeramente los 21kN. Se escogieron limitadores de carga con diferentes niveles de carga límite: 20, 18, 16 y 14 kN. De esta forma, si la carga máxima durante la construcción del edificio fuera inferior, se requerirían puntales de menor capacidad resistente y más económicos.
- El canto del forjado, tomando como valores: 20, 25, 30 y 35 cm.
- Los intervalos de tiempo entre operaciones constructivas. Se consideraron aquellos intervalos de tiempo definidos con anterioridad, con una duración total del proceso constructivo de 25 días; aumentando los intervalos en 1 día con una duración total de 33 días; y disminuyendo los intervalos en 1 día con una duración total de 17 días.

En la Tabla 3.1 se pueden observar los distintos factores considerados. Combinando de forma correcta dichos factores, se configuró un extenso análisis paramétrico donde se procesaron hasta 60 modelos distintos.

Tabla 3.1. Factores considerados.

Factores	Carga límite [kN]	Canto forjados [cm]	Intervalos de tiempo entre operaciones constructivas
Niveles	Sin limitación	20	Sin modificar Incremento en 1 día Reducción en 1 día
	20.0	25	
	18.0	30	
	16.0	35	
	14.0		

Una vez procesados los distintos modelos, se puede afirmar que:

- La variación de los intervalos de tiempo entre pasos de carga produce cambios en la carga máxima de los puntales, aumentando si los intervalos disminuyen y disminuyendo si los intervalos aumentan. Sin embargo, aumentar o reducir en un día los intervalos de tiempo entre pasos de carga supone una variación de las cargas máximas en puntales inferior al 1.2%.
- Para cantos de forjado mayores, la proporción de carga asumida por éstos es mayor. Las flechas también disminuyen dada la mayor rigidez del forjado.
- A medida que se imponen niveles de plastificación más restrictivos en el limitador de carga (menor carga límite) mayor es el número de limitadores de carga que pasan a tener un comportamiento plástico y menor es la capacidad resistente necesaria del sistema de apuntalamiento.
- Los aumentos de las cargas recibidas por los forjados y de las máximas flechas debido a imponer menores cargas límite son reducidos.

La Tabla 3.2 muestra algunos de los resultados obtenidos para el tercer paso de carga (hormigonado del forjado 2) en el forjado 1, tomando como ejemplo los distintos modelos procesados con canto del forjado de 25cm e intervalos de tiempo entre operaciones constructivas aumentados en un día. Se presentan como resultados de esta tabla: los coeficientes de carga del forjado 1 (C_f) y del primer nivel de puntales (C_p), obtenidos como la carga que reciben entre el peso propio del forjado; la máxima flecha del forjado 1; los momentos máximos positivos (en centro de vano) y negativos (en pilares); y la comprobación satisfactoria de la fisuración del forjado 1.

Tabla 3.2. Resultados obtenidos para el forjado 1 en el tercer paso de carga para el caso con forjados de 25cm de canto y aumento de los intervalos de tiempo en 1 días.

Máx. carga en puntales [kN]	C_f	C_p	Forjado 1 (9 días)					¿Fisura?
			Máx. flecha [mm]	M+ [KN*m/m]	M- [KN*m/m]	M _{fisuración} [KN*m/m]		
21.3	0.82	1.18	1.03	11.2	23.0	30.3		NO
20.0	0.82	1.18	1.04	11.2	23.0	30.3		NO
18.0	0.83	1.17	1.12	11.5	23.2	30.3		NO
16.0	0.86	1.14	1.33	13.2	24.3	30.3		NO
14.0	0.94	1.06	1.65	16.0	27.0	30.3		NO

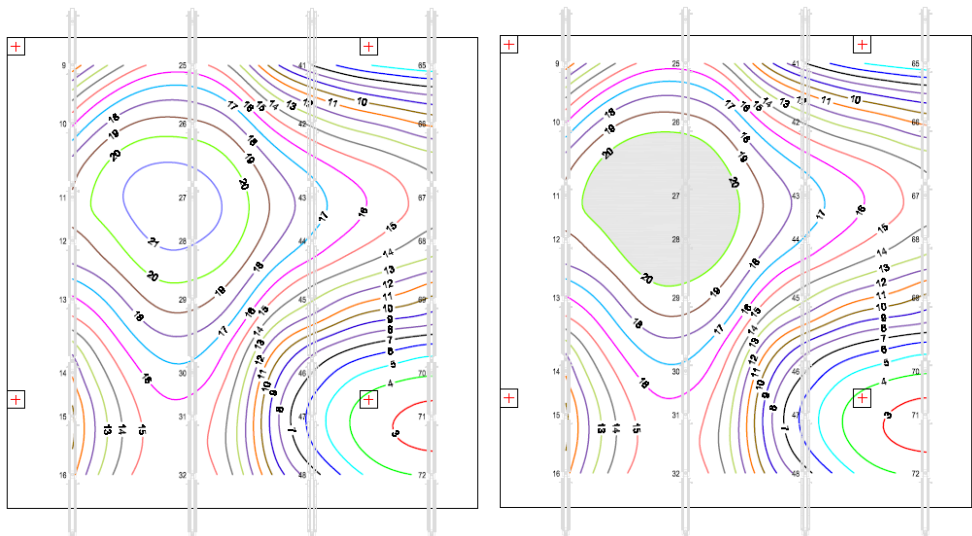


Fig. 3.5. Isolíneas de cargas en puntales. Sin limitadores de carga (izquierda) y con limitadores de 20.0kN (derecha).

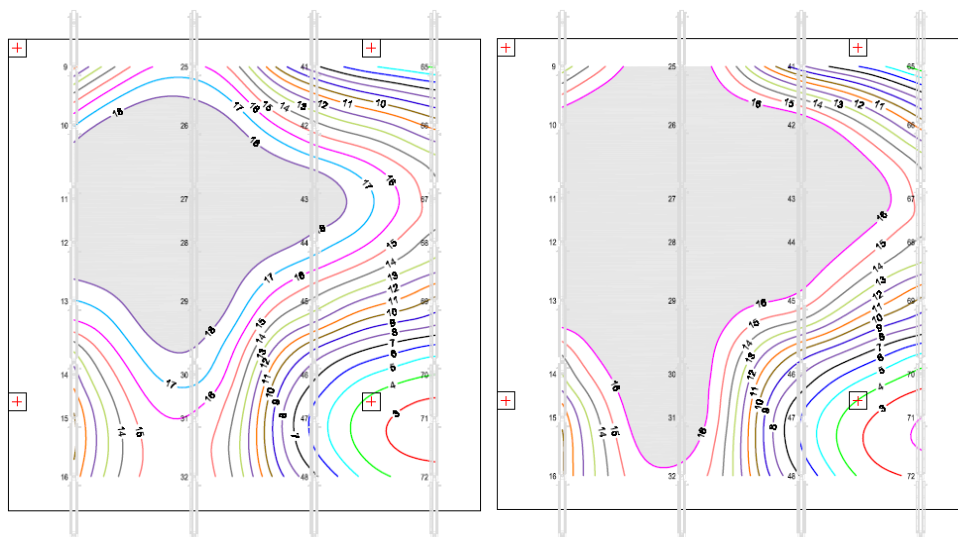


Fig. 3.6. Isolíneas de cargas en puntales. Con limitadores de carga de 18.0kN (izquierda) y de 16.0kN (derecha).

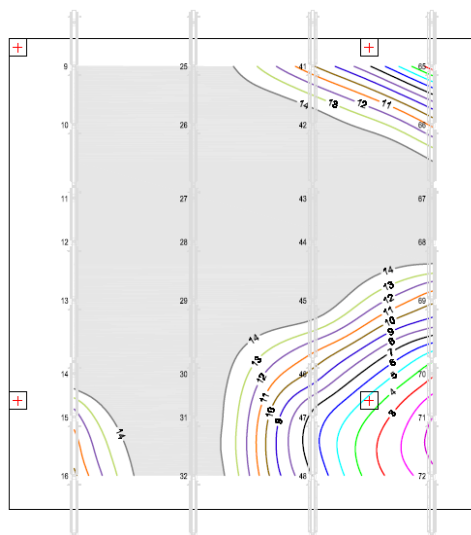


Fig. 3.7. Isolíneas de cargas en puntales con limitadores de carga de 14.0kN.

Además, para observar la influencia del nivel de la carga límite de los limitadores de carga, se han generado gráficos de isolíneas de cargas en puntales que muestran zonalmente, y de forma superpuesta a la distribución en planta de los puntales del primer nivel durante el hormigonado del forjado 2, qué cargas tendrían los puntales. La Fig. 3.5, la Fig. 3.6 y la Fig. 3.7 muestran como a medida que la carga límite definida es menor, el número de limitadores de carga que pasa a tener un comportamiento plástico es mayor, siendo la capacidad resistente necesaria de los

puntales cada vez menor. En estas figuras, la zona sombreada indica que los puntales aquí situados han alcanzado la carga límite y, consecuentemente, tienen un comportamiento plástico.

La Tabla 3.2 y la Fig. 3.8 muestran la variación de la carga máxima de los puntales, y su repercusión tanto en la carga del forjado 1 como en las flechas máximas. Se puede observar que el efecto es reducido para pequeñas reducciones de la carga máxima de los puntales. Sin embargo, a medida que se reduce la carga límite, el efecto en la carga y la flecha del forjado se incrementa de forma exponencial. La Fig. 3.9 muestra cuantitativamente como a medida que la carga límite del limitador de carga es menor, el número de limitadores de carga que pasa a tener un comportamiento plástico es mayor.

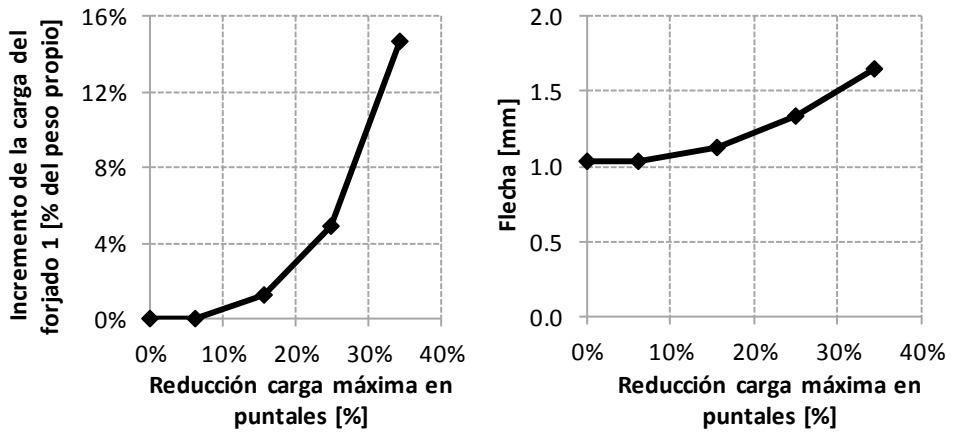


Fig. 3.8. Incremento de la carga que recibe el forjado 1 y la máxima flecha en función de la reducción de la carga máxima en puntales debido a la carga límite de los limitadores de carga.

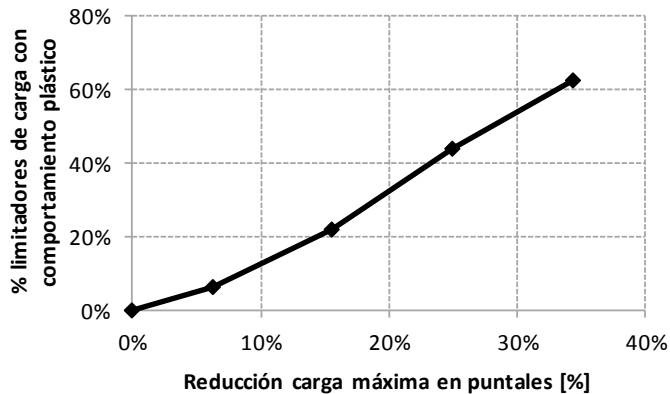


Fig. 3.9. Porcentaje de limitadores de carga con comportamiento plástico respecto al número total de puntales de la planta clareada.

3.3. Estudio de la viabilidad técnico-económica de los limitadores de carga aplicado al caso de un edificio real

3.3.1. Descripción del edificio real considerado para el estudio

El edificio, ejecutado para la facultad de Bellas Artes de la Universitat Politècnica de Valencia, consta de 6 plantas y un sótano. Los forjados de todas las plantas son reticulares de casetón recuperable de 0.40m de canto (35+5), 0.80m de intereje y 0.15m de ancho de nervio. Los vanos tienen unas dimensiones de 5.50x8.00m² y 5.50x8.80m². La altura entre plantas varía entre 2.90m y 4.00m. El hormigón utilizado para la construcción de todos los elementos del edificio presentaba una resistencia característica a compresión de 30MPa. En la Fig. 3.10 se puede ver este edificio durante su construcción.



Fig. 3.10. Fotografía de la fase constructiva del edificio de la facultad de Bellas Artes.

3.3.2. Modelo de elementos finitos

Tomando como base las simulaciones realizadas en anteriores trabajos [80], en este apartado se plantea un modelo de elementos finitos que pretende simular la construcción del edificio descrito considerando los limitadores de carga en puntales. Para realizar dicho modelo se empleó el software comercial ANSYS [107]. Se consideraron las características geométricas y mecánicas de cada uno de los elementos que intervienen en la construcción del edificio, y un cálculo evolutivo para simular el proceso constructivo. Las hipótesis adoptadas para realizar el MEF son idénticas a las adoptadas en la simulación anterior (apartado 3.2.2). Además, los muros de sótano se consideraron como elementos con un comportamiento elástico y lineal.

Para simular el proceso constructivo del edificio en el MEF se consideraron también que las distintas condiciones de apoyo (puntales, sopandas y encofrado) y las características mecánicas del hormigón son cambiantes con el tiempo. Los pasos de

carga seguidos en el MEF se corresponden con un ciclo habitual para un proceso constructivo CCD de dos plantas consecutivas apuntaladas hasta el hormigonado del forjado 4. A continuación, en la Fig. 3.11, la Fig. 3.12 y la Fig. 3.13 se indican las fases correspondientes a cada paso de carga, observando, además, los intervalos de tiempo entre pasos de carga considerados.

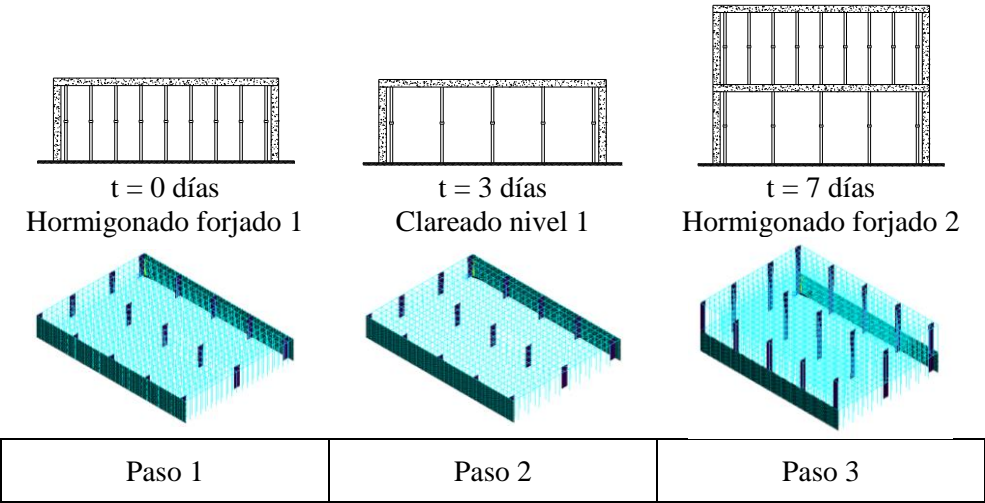


Fig. 3.11. Pasos de carga correspondientes a las diferentes operaciones constructivas (I).

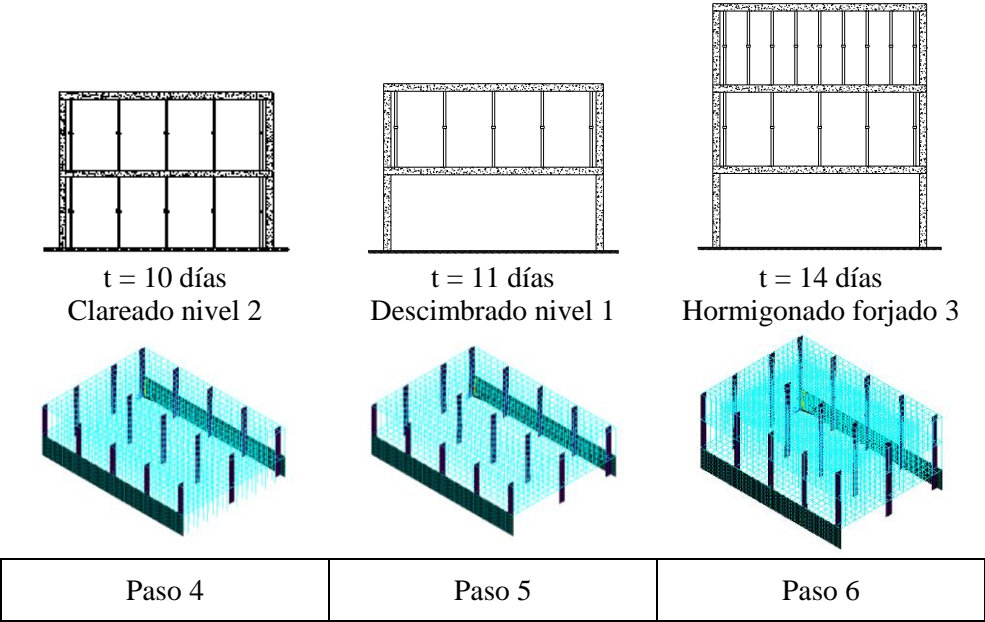


Fig. 3.12. Pasos de carga correspondientes a las diferentes operaciones constructivas (II).

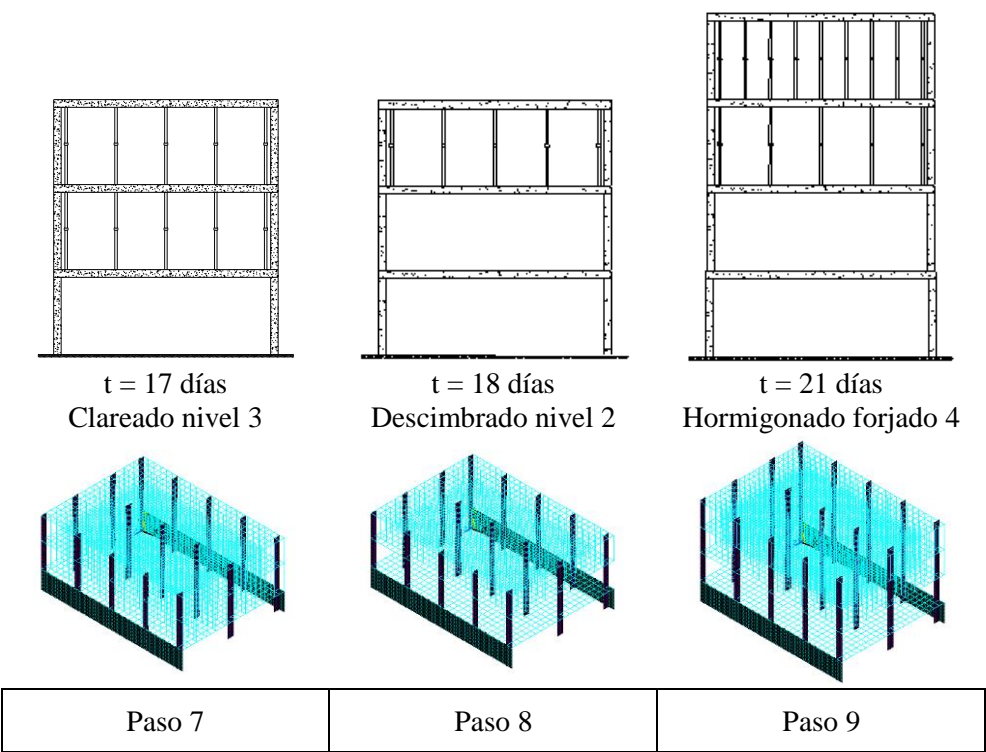


Fig. 3.13. Pasos de carga correspondientes a las diferentes operaciones constructivas (III).

Dado que el objetivo perseguido en este estudio es la aplicación de los limitadores de carga a un caso real, el único factor considerado es la máxima carga transmitida a los puntales, es decir, la carga límite de diseño de los limitadores de carga. Durante la fase de redacción del proyecto deben plantearse y considerarse distintas hipótesis de carga. De esta forma, las hipótesis de carga consideradas fueron: a) la hipótesis más favorable con tan solo el peso propio de la estructura, y b) la hipótesis más desfavorable con el peso propio de la estructura más las sobrecargas.

La elección de la carga límite de los limitadores de carga se realizó para que existan limitadores de carga con comportamiento plástico incluso en la hipótesis más favorable (peso propio de la estructura). Así pues, realizando un análisis previo sin limitadores de carga y con la hipótesis más favorable, se observó que la carga transmitida al puntal más cargado es de 17.0kN aproximadamente, localizada en el primer nivel de apuntalamiento en el paso de carga correspondiente al hormigonado del forjado 2. Por lo tanto, como cargas límite de los limitadores de carga se establecieron 15.0kN y 12.0kN.

3.3.3. Resultados

Se presentan, en primer lugar, los resultados para la hipótesis más favorable (acciones permanentes características). Se han generado gráficos de isolíneas de carga en puntales que muestran zonalmente qué cargas tendrían los puntales. En la Fig. 3.14 puede observarse como para el caso en el que no existe limitación en la carga transmitida a los puntales, la máxima carga está alrededor de los 17.0kN como se había comentado anteriormente.

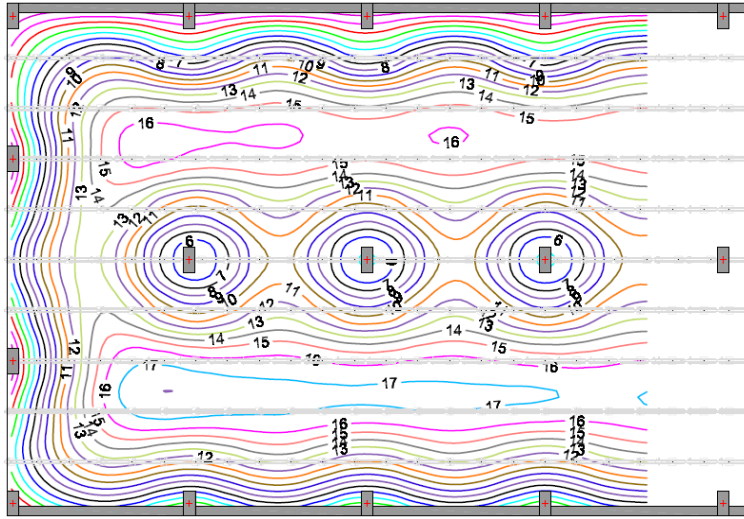


Fig. 3.14. Acciones permanentes características. Isolíneas de carga en puntales sin limitadores de carga.

Si reducimos la carga límite de los puntales con limitadores de carga de 15.0kN, todos los puntales estarán por debajo de este valor. La Fig. 3.15 muestra como los limitadores de carga en puntales dentro de la zona sombreada tienen un comportamiento plástico con una carga máxima de 15.0kN. A medida que limitadores de carga con una carga límite más reducida (en este caso a 12.0kN) se puede observar en la Fig. 3.16 como la zona sombreada adquiere mayor tamaño, siendo el número de limitadores de carga en puntales que pasa a tener un comportamiento plástico mayor.

A continuación, se realizó el análisis bajo la hipótesis de carga más desfavorable: cargas permanentes más sobrecargas de 1.0kN/m². Tradicionalmente, el diseño del sistema de apuntalamiento se realiza con un dimensionamiento clásico, trabajando con cargas admisibles de los puntales, que presentan coeficientes de seguridad de 2.0-2.5, y sin coeficientes de mayoración de las acciones. Sin embargo, en este caso de aplicación real, con el objetivo de exigir todavía más a la estructura, analizar cómo se comportaría en situaciones extremas, y teniendo en cuenta que se están utilizando limitadores de carga que modifican el concepto de carga admisible de un puntal, se

aplicó también un coeficiente de mayoración de las acciones de 1.25, tanto a las cargas permanentes como a las sobrecargas.

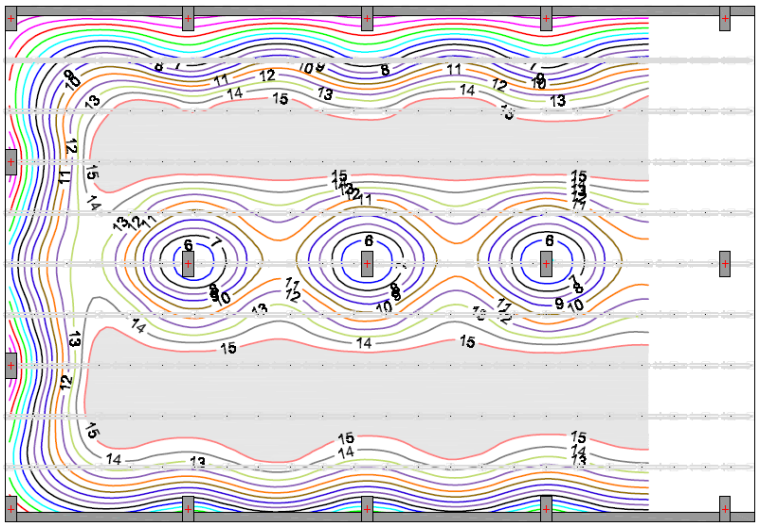


Fig. 3.15. Acciones permanentes características. Isolíneas de carga en puntales con limitadores de carga de 15.0kN.

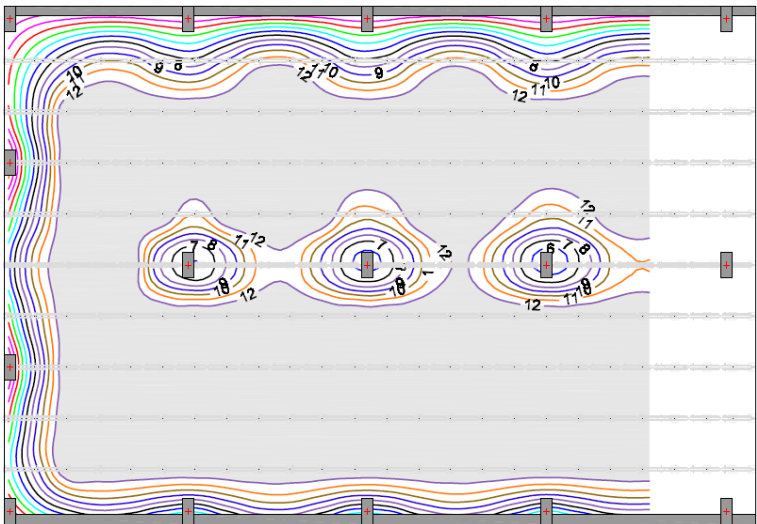


Fig. 3.16. Acciones permanentes características. Isolíneas de carga en puntales con limitadores de carga de 12.0kN.

En la Fig. 3.17 puede observarse como para el caso sin limitadores de carga, las cargas máximas en puntales son ligeramente superiores a los 25.0kN. Con el uso de limitadores de carga de 15.0kN y 12.0kN (Fig. 3.18 y Fig. 3.19 respectivamente) los limitadores de carga bajo la zona sombreada pasan a tener un comportamiento

plástico siendo esta zona cada vez mayor. Aunque la redistribución de cargas máximas parece excesiva para esta hipótesis más desfavorable, en ningún caso se produce fisuración en el forjado, como se puede observar en la Tabla 3.3. Esta es una de las razones por la que la viabilidad estructural del uso de los limitadores de carga queda confirmada al considerarse dicha hipótesis el criterio que condiciona el diseño de los procesos constructivos de cimbrado y descimbrado de edificios.

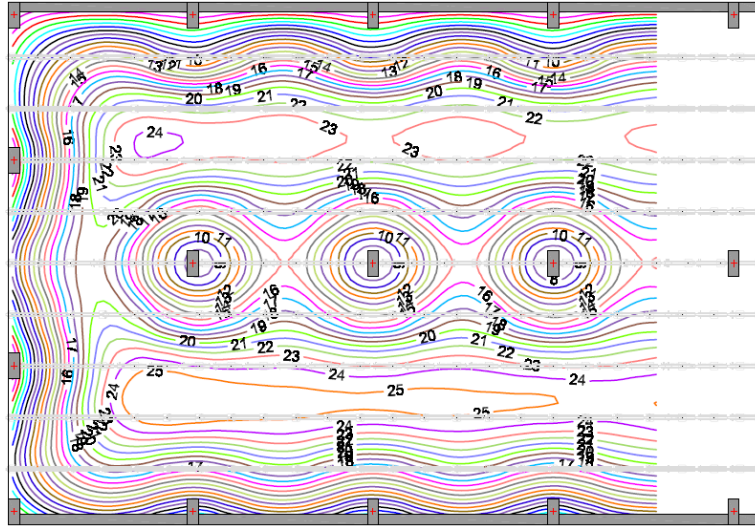


Fig. 3.17. Acciones permanentes más sobrecargas. Isolíneas de carga en puntales sin limitadores de carga.

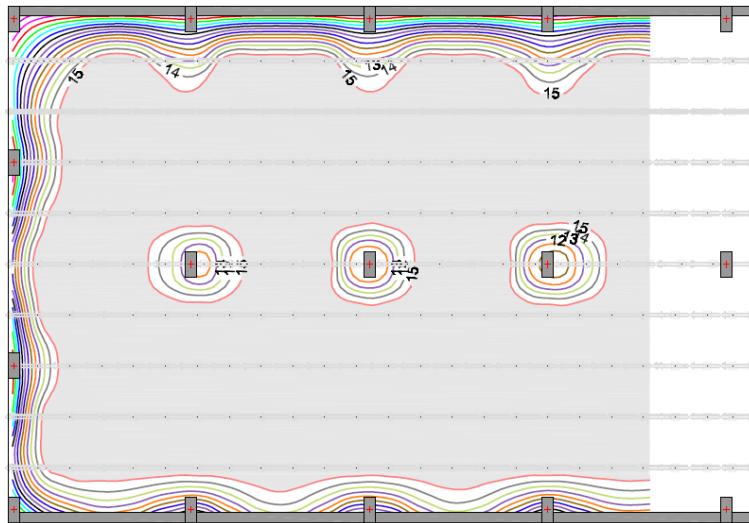


Fig. 3.18. Acciones permanentes más sobrecargas. Isolíneas de carga en puntales con limitadores de carga de 15.0kN.

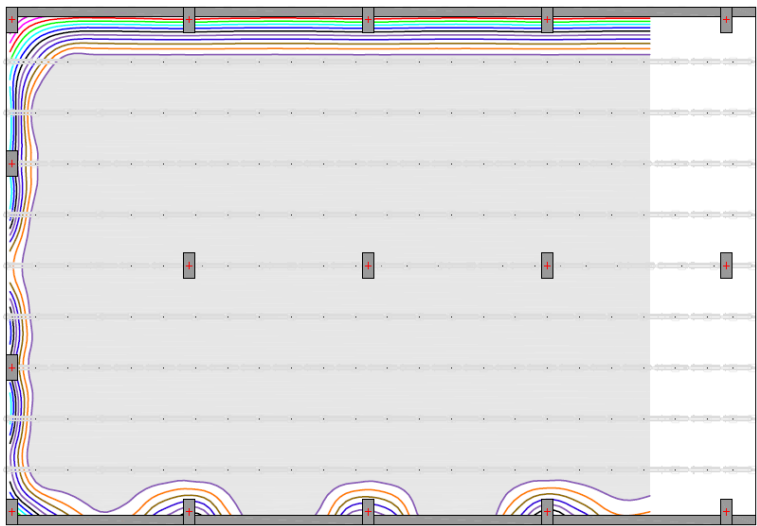


Fig. 3.19. Acciones permanentes más sobrecargas Isolíneas de carga en puntales con limitadores de carga de 12.0kN.

La Tabla 3.3 muestra los resultados para los distintos modelos calculados. Las cargas máximas en puntales y los coeficientes de forjados se han obtenido para la combinación de acciones con coeficientes de mayoración, mientras que la flecha y la comprobación de fisuración del forjado se realizan para la combinación de cargas característica. Se pueden observar los descensos considerables de la máxima carga en puntales (de 25.7kN a 12.0kN) y cómo los forjados reciben una mayor carga siendo su contribución mayor y la de los puntales menor. En ningún caso se produce fisuración en el forjado.

Tabla 3.3. Resultados obtenidos para el forjado 1 en el tercer paso de carga.

Modelo	Máx. carga en puntales [kN]	C _f	C _p	Forjado 1 (7 días)					
				Máx. flecha [mm]	M+ [KN*m/m]	M- [KN*m/m]	M ⁺ _{fisura} [KN*m/m]	M ⁻ _{fisura} [KN*m/m]	¿Fisura?
M-1	25.7	0.82	1.18	1.02	8.9	27.8	15.5	59.5	NO
M-2	15.0	0.96	1.04	1.50	11.2	30.5	15.5	59.5	NO
M-3	12.0	1.08	0.92	2.08	14.1	38.5	15.5	59.5	NO

La Fig. 3.20 muestra la evolución de las cargas medias recibidas por el primer forjado y de las máximas flechas al utilizar diferentes limitadores de carga que provocan una reducción de la carga de los puntales.

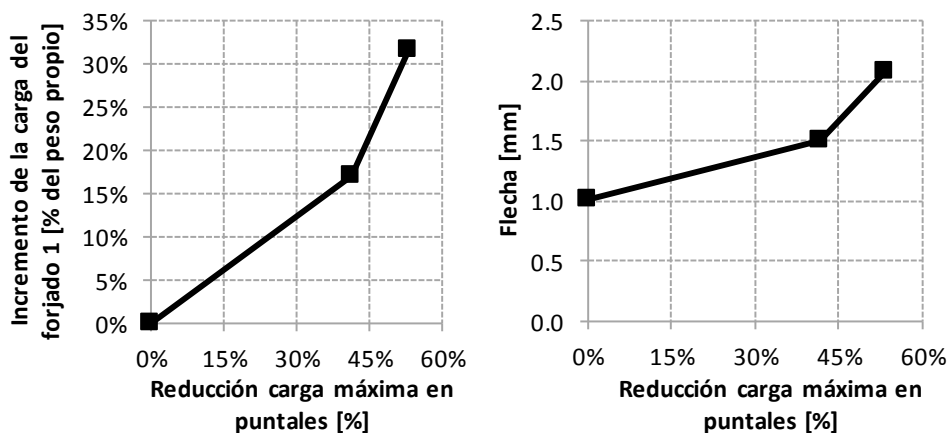


Fig. 3.20. Evolución de la carga recibida (izquierda) y de las máximas flechas (derecha) del primer forjado.

3.3.4. Análisis económico

El análisis económico realizado presenta un estudio de los posibles costes de los puntales con limitadores de carga. Para tener una magnitud representativa del valor económico que tiene un puntal dependiendo de su carga admisible, se ha utilizado un valor expresado en euros por kN (€/kN) que permite evaluar la diferencia económica entre las diferentes opciones en función de la carga admisible requerida. Para la obtención de este valor se evaluó la resistencia media de los puntales empleados y el coste económico, a modo de alquiler, que tiene cada uno de los puntales por día que permanece en la obra. Tras la consulta de diferentes catálogos se decidió adoptar una carga media de 27.0kN como carga admisible de los puntales con una altura de funcionamiento de entre 2.0m y 4.0m, y un coste por día que permanecen en la obra de 7 céntimos de euro. Con estos valores, y conociendo la duración del proceso constructivo y el número de puntales necesarios para la construcción del edificio, se determinó que el coste de los puntales aplicado al caso del edificio estudiado es de 274.4 €/kN. Ahora solo queda escalar este valor en función de las cargas máximas de los puntales. En la Tabla 3.4 se muestra el coste de todos los casos estudiados y el ahorro que supone la introducción de los limitadores de carga en los puntales.

Además, al coste de los puntales debe sumarse el coste de los limitadores de carga. Observando el ahorro en el coste de los puntales que ha supuesto el empleo de limitadores de carga en puntales, y conociendo cuántos elementos resultarían necesarios para cada modelo, puede obtenerse el coste máximo de los limitadores de carga en cada caso. Para el caso concreto del edificio estudiado, el M-2, con carga límite de 15.0kN, solo necesita limitadores de carga en la primera planta clareada, mientras que el M-3, con carga límite de 12.0kN, los necesita en todas las plantas

clareadas debido al comportamiento plástico de los limitadores en cada uno de los niveles del sistema de apuntalamiento. De esta forma, el coste máximo de cada limitador carga, que no produciría ninguna ventaja económica, es:

- Unos 5€ para el M-2 con carga límite de 15.0kN.
- Aproximadamente 1€ para el M-3 con carga límite de 12.0kN.

Tabla 3.4. Comparación del coste de los puntales con y sin limitadores de carga.

Modelo	Coste	Ahorro [%]	Ahorro [€]
M-1	7052 €		
M-2	4116 €	42%	2936 €
M-3	3293 €	53%	3759 €

Resulta más económico el M-2 que el M-3 porque, como se ha comentado, solo se necesitan limitadores de carga en puntales en la primera planta clareada. Desde el punto de vista económico, se recomienda que el comportamiento plástico de los limitadores de carga solo se provoque en un número reducido de plantas.

De forma más general, tomando como referencia que el coste de un limitador de carga en puntales podría, incluso debería, ser de unos 0.5€, y conociendo la cantidad de éstos que se necesitan para cada caso, la Tabla 3.5 muestra el coste en €/m² de edificio del conjunto que forman los puntales más los limitadores de carga en puntales. Se puede observar que bajo las condiciones económicas y el caso estudiado en este apartado se pueden conseguir ahorros de hasta el 30% y el 40% en el coste de los puntales al utilizar los limitadores de carga.

Tabla 3.5. Comparación del coste total por m² de edificio.

Modelo	Coste puntales (€/m ²)	Coste limitadores de carga (€/m ²)	Coste total (€/m ²)	Ahorro (€/m ²)	Ahorro (%)
M-1	8.6 €	0.0	8.6	--	--
M-2	5.0 €	0.4	5.4	3.2	37%
M-3	4.0 €	0.4*6	6.1	2.4	28%

3.4. Conclusiones

En este capítulo se ha estudiado la viabilidad técnico-económica del uso de limitadores de carga en puntales durante la construcción de estructuras de edificios. Este estudio preliminar se llevó a cabo mediante simulación numérica tomando como referencia los modelos de elementos finitos empleados anteriormente por Alvarado

[79,90], para un edificio experimental, y Gasch [80], para el edificio de la facultad de Bellas Artes de la Universitat Politècnica de València. El empleo de limitadores de carga en puntales ha demostrado que provoca una redistribución de cargas máximas en puntales en la transmisión de cargas entre forjados y puntales, repartiendo estas cargas entre los diferentes forjados y el sistema de apuntalamiento. Esta redistribución de cargas se produce en aquellas operaciones constructivas en las que el sistema de apuntalamiento está más solicitado. En estas mismas operaciones constructivas es cuando, sin embargo, los forjados reciben menos carga. De hecho, aunque la redistribución de carga provoque un ligero aumento de carga y desplazamiento en los forjados, en ningún momento se produce fisuración ya que estos elementos pueden asumir más carga en estas operaciones constructivas sin ningún problema. Consecuentemente, el uso de limitadores de carga debería acotarse a aquellas situaciones en las que no se perjudica la fisuración de los forjados y actuar en aquellas fases constructivas donde los forjados están menos exigidos. Por lo tanto, la viabilidad técnica se ha demostrado desde diferentes puntos de vista:

- Un aumento de la Seguridad al conseguir una redistribución de cargas máximas en puntales y, bajo condiciones controladas, sin producir fisuración en el forjado. Además, se gana en seguridad frente a acciones imprevistas y/o accidentales como, por ejemplo: fallo de un puntal, sobrecargas inesperadas, acciones humanas, etc.
- Un aumento de la Eficiencia Estructural al permitir la redistribución de cargas máximas en puntales. Esta redistribución conlleva a un mayor aprovechamiento de la resistencia de cada uno de los puntales, y de parte de la resistencia no utilizada de los forjados.

También ha quedado demostrada la viabilidad económica del uso de limitadores de carga al permitir optimizar los costes de ejecución de los forjados, empleando sistemas de apuntalamiento que resistan cargas inferiores o con un número inferior de puntales. Como se ha visto en el caso concreto estudiado, podrían alcanzarse reducciones del coste total de los puntales más los limitadores de carga entre un 30% y un 40 %.

CAPÍTULO 4. DISEÑO, FABRICACIÓN, ENSAYO Y SIMULACIÓN DE LIMITADORES DE CARGA

4.1. Introducción

En el presente capítulo se presenta el diseño, la fabricación, los ensayos realizados y aspectos sobre la simulación numérica de limitadores de carga. Tal y como se ha comentado anteriormente, los limitadores de carga son dispositivos capaces de limitar la carga que un puntal recibe por debajo del nivel de la carga límite a la que ha sido diseñado el limitador de carga. Además, deberían ser capaces de mantener esta carga tras alcanzar dicho valor para no provocar una pérdida repentina de cualquier puntal que alcance la carga límite. La pérdida repentina de puntales durante la construcción de estructuras de edificios es una de las principales razones de fallos durante la construcción [12,13].

El desarrollo aquí presentado tiene como objetivo llevar a cabo un prototipo válido, que permita demostrar su viabilidad técnica real y sirva de escaparate para un desarrollo industrial posterior. Este desarrollo industrial deberá ser realizado por las distintas empresas de encofrados, para el ajuste de los limitadores de carga a las exigencias concretas de la empresa y a los distintos tipos de puntales existentes. También cabe destacar que el desarrollo aquí presentado está protegido bajo la Patente ES2636833.

Como idea conceptual y en relación a todo lo estudiado hasta el momento, a continuación, se establecen los requisitos que se le exigen a los limitadores de carga:

- Versatilidad. Los limitadores de carga deben ajustarse a cualquier tipo de puntal y presentar una carga límite definida por el usuario.
- La rigidez inicial (rama elástica) del puntal con el limitador de carga instalado debe ser similar a la rigidez de un puntal sin limitadores. Es decir, la introducción de los limitadores de carga no debe producir una alteración de la rigidez de los puntales.
- Deben presentar un comportamiento plástico al alcanzar la carga límite prevista.
- El comportamiento plástico debe estar limitado para no producir flechas excesivas en los elementos constructivos que sustentan los puntales (en los forjados, por ejemplo).

- Tras alcanzar la carga límite, deben mantener la carga al valor de la carga límite o en valores ligeramente superiores mientras se agota el máximo desplazamiento plástico permitido.
- Tras agotar el máximo desplazamiento plástico deben aprovechar la resistencia residual del puntal hasta su punto de rotura.
- Deben ser reutilizables mientras no se haya agotado el máximo desplazamiento plástico permitido.
- El coste debe ser mucho más reducido que el coste de un puntal si el objetivo es transferirlo a la industria.

Para el desarrollo de los limitadores de carga se ha tomado como referencia un determinado tipo de puntal de una empresa de encofrados puntera a nivel internacional. Esta empresa, Encofrado J. Alsina, S.A., ha colaborado asiduamente con nuestro grupo de investigación. El puntal considerado es el puntal Alisan de 3m de altura máxima [16]. Este aspecto no supone una limitación al desarrollo llevado a cabo en este capítulo. El dispositivo desarrollado, manteniendo su diseño, es sencillamente ajustable a cualquier tipo de puntal con tan solo ajustar su geometría. La Fig. 4.1 muestra una descripción de las partes del puntal considerado.

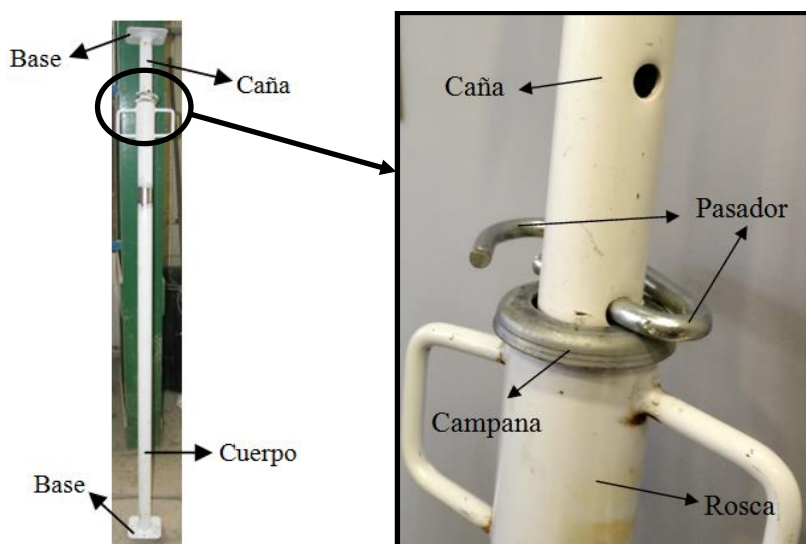


Fig. 4.1. Partes de un puntal (izquierda) y detalle de la zona de fijación del puntal telescópico (derecha).

En los siguientes sub-apartados se presenta: a) el camino seguido en el diseño de limitadores de carga hasta alcanzar su diseño definitivo; b) cómo se realizó su fabricación; c) los ensayos realizados y los resultados obtenidos; d) unos últimos detalles acerca de la simulación numérica de limitadores de carga; y e) una serie de conclusiones.

4.2. Diseño

En la fase de diseño se pueden diferenciar claramente dos etapas: una primera etapa en la que se realizó un diseño conceptual del limitador de carga donde se plasman las primeras ideas acerca de su diseño para conseguir el comportamiento teórico deseado; y una segunda etapa en la que las primeras ideas se desarrollaron en profundidad mediante un diseño de detalle. En los siguientes sub-apartados se detalla el camino seguido hasta la consecución del diseño definitivo de este nuevo dispositivo.

4.2.1. Diseño conceptual

Desde un inicio, y tal y como ha quedado reflejado en el Capítulo 3, el diseño del limitador de carga (definido por sus siglas en inglés: LL) debe perseguir un comportamiento teórico del puntal con limitadores de carga instalados como el mostrado en la Fig. 4.2. En esta figura se muestra el comportamiento tenso-deformacional del conjunto puntal más limitador de carga (representado en color negro) y el del puntal sin limitadores de carga (representado en color azul).

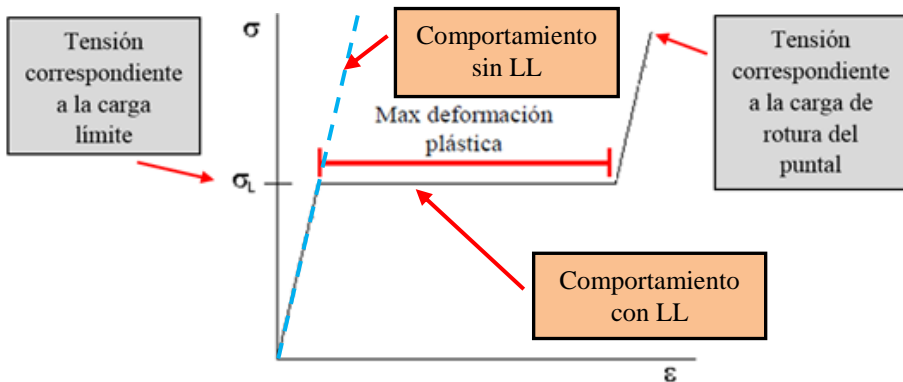


Fig. 4.2. Comportamiento teórico de los puntales con limitadores de carga instalados (en negro) y sin limitadores de carga (en azul).

Un puntal sin limitadores de carga tiene un comportamiento elástico y lineal hasta su punto de rotura. El fallo, bien sea por pandeo del puntal o por plastificación del pasador, es totalmente repentino, tal y como fue demostrado por Alvarado [79]. Este tipo de fallo provoca la inutilización del puntal que, consecuentemente, no contribuirá a seguir soportando las cargas que recibía y será necesaria una redistribución de toda la carga del puntal, a través del forjado, hacia los puntales vecinos con anterioridad al colapso del puntal.

En cambio, un puntal con limitadores de carga instalados presenta el mismo comportamiento hasta la tensión o carga límite definida en función de su diseño. A partir de este punto, y en lugar de presentar un punto de rotura repentino que inhabilitaría su función de soporte, el comportamiento teórico asumido presenta un

tramo perfectamente plástico, manteniendo la carga del puntal al nivel de la carga límite de diseño y evitando su sobrecarga. Generalmente los elementos con un comportamiento similar se conocen como fusibles, sobre todo en el sector industrial, porque a través de la rotura prematura de estos elementos se evita la rotura de componentes más importantes. A diferencia de los fusibles, el limitador de carga permite mantener el nivel de carga del puntal a la carga límite mediante un comportamiento perfectamente plástico. Este comportamiento plástico viene limitado a un valor máximo de deformación o desplazamiento plástico por razones de seguridad y posible fisuración excesiva de los forjados, que provocaría su inutilización o su mal funcionamiento en condiciones de servicio. Gracias al mantenimiento de la función de soporte durante el comportamiento plástico, el sistema permite redistribuir, a través de los forjados hacia los puntales vecinos, la carga en exceso que hubiera absorbido dicho puntal sin limitadores de carga. Se evita así la rotura repentina del puntal y se le proporciona a este elemento un cierto grado de ductilidad que incrementa considerablemente la seguridad en su funcionamiento. Tras alcanzar la máxima deformación plástica permitida, el puntal vuelve a admitir carga hasta su punto de rotura, aprovechando así toda su capacidad resistente.

Uno de los aspectos más complicados consiste en trasladar este comportamiento teórico a un elemento que, instalado en los puntales, proporcione al puntal un comportamiento similar al definido. Encontrar un material que se comporte de tal forma, para cualquier carga límite de diseño, fue una de las primeras soluciones que se plantearon. Sin embargo, aunque podría no ser imposible, sí que supone una de las alternativas más complicadas que, probablemente, tendría un coste desmesurado. Cabe recordar que el coste de los limitadores de carga para los puntales debe estar alrededor a 1€ si la intención es que la industria aplique esta nueva tecnología en la construcción de estructuras de edificios. Alternativamente se planteó un elemento que, incorporado al puntal entre el pasador y la campana, funcionara como un sistema estructural con el comportamiento teórico definido. La ubicación escogida permite centralizar todas las operaciones de montaje de un puntal, también con limitadores de carga, a la zona de la rosca del puntal. En cualquier otra ubicación, su instalación y concepción serían sustancialmente más complicadas. A diferencia del sistema tradicional, la trayectoria de la carga en el puntal no pasaría directamente del pasador a la campana puesto que el limitador de carga trabajaría entre estos dos elementos. En la Fig. 4.3 se puede observar un esquema seccional del puntal para dos alternativas de instalación de los limitadores. Una primera en la que el limitador aparece anclado a la rosca a través de dos muescas. Y una segunda en la que el limitador de carga, formado por una pareja de elementos representados en forma de muelles, aparece instalado entre el pasador y la campana del puntal, apoyado sobre la misma. Se descartó la primera alternativa por su mayor dificultad y por la acumulación de tensiones que se producirían en el contacto entre el limitador y la rosca.

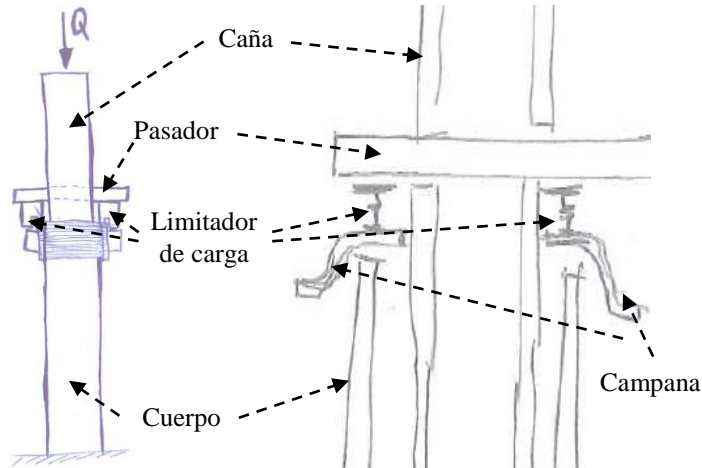


Fig. 4.3. Boceto de la ubicación del limitador de carga en el puntal: alternativa mediante el anclado en la rosca (izquierda) y alternativa sobre la campana (derecha).

Una vez decidido en qué ubicación se realizaba la interrupción de la trayectoria de la carga para la disposición del limitador de carga, debía definirse el sistema estructural que permitiera tener un comportamiento similar al definido en la Fig. 4.2. Una de las primeras ideas fue la concepción del limitador de carga en un sistema estructural tipo pórtico en el que aparecieran el número suficiente de rótulas plásticas para desestabilizarlo, justo bajo la aplicación de la carga límite. Así, en la Fig. 4.4 se muestra, como la primera aproximación a la solución, un esquema del sistema estructural tipo pórtico y la conversión de esta idea a uno de los elementos que forman el limitador de carga. En este elemento se puede observar la ubicación estratégica de secciones débiles para fomentar y localizar la aparición de rótulas plásticas en estas posiciones.

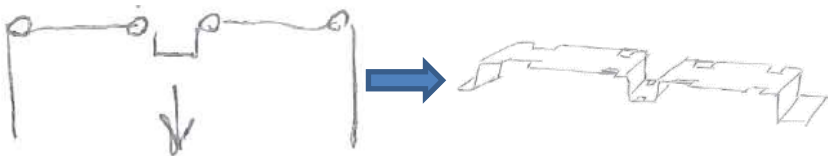


Fig. 4.4. Boceto del sistema estructural tipo pórtico y su materialización en uno de los elementos que forman el limitador de carga.

Cabe destacar también que, ya desde un primer momento, existió la preocupación de incorporar un albergue en el limitador de carga para el posicionamiento del pasador en su parte superior. No obstante, las pequeñas dimensiones que tendrían los limitadores de carga (alrededor a los 2-3cm de longitud) imposibilitaron recrear el albergue del pasador tal y como se ha representado. Se descartó entonces esta solución, adoptando una solución idéntica sin albergue. En la Fig. 4.5 aparece un esquema de medio elemento de un limitador de carga sin el albergue del pasador.

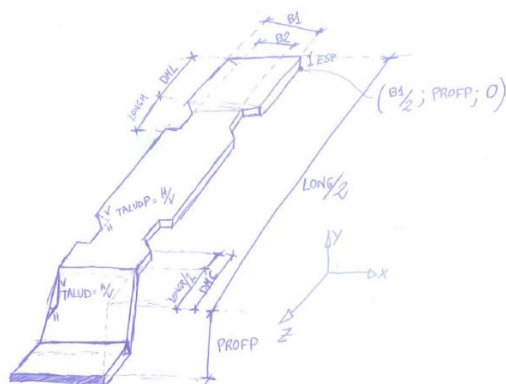


Fig. 4.5. Boceto de medio elemento del limitador de carga sin albergue para el pasador.

Adicionalmente, si se prescinde del albergue del pasador, tampoco es necesario incorporar 4 secciones débiles para la aparición de rótulas plásticas. Con tan solo 3 secciones débiles es suficiente para desestabilizar de forma simétrica el sistema estructural bajo la carga límite de diseño. La Fig. 4.6 muestra un esquema de un elemento completo del limitador de carga con 3 secciones débiles.

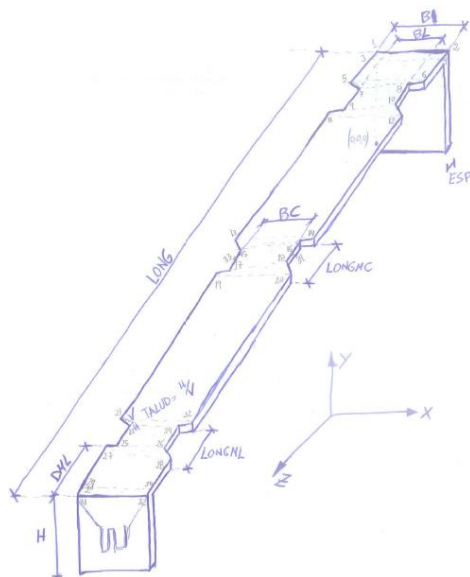


Fig. 4.6. Boceto de un elemento del limitador de carga con 3 secciones débiles.

El comportamiento estructural de este sistema tipo pórtico puede ser controlado a través de las características mecánicas del material y su definición geométrica. Así, la versatilidad de este diseño conceptual es de tal magnitud que permitiría diseñar y materializar distintos limitadores de carga con niveles distintos de carga límite, y así cumplir con los requisitos marcados. Incluso su coste se espera reducido, porque se

puede fabricar con uno de los materiales más económicos que existe en el mercado como es el acero, que permite además escoger su calidad (límite elástico/resistencia) de entre un amplio catálogo normalizado, estandarizado y totalmente accesible (235MPa, 275MPa, 355MPa, 420MPa, etc.).

4.2.2. Diseño de detalle

Tras el diseño conceptual donde se definió, en líneas generales, la geometría y el sistema estructural de los limitadores de carga, se inició el diseño de detalle mediante simulación numérica con ANSYS [107]. En los sucesivos sub-apartados se describen las distintas aproximaciones realizadas hacia la solución definitiva. Finalmente se presenta el diseño definitivo para el que se utilizó la técnica del diseño de experimentos (DOE: Design Of Experiments) con el objetivo de definir un catálogo exhaustivo de diferentes limitadores de carga.

4.2.2.1. Primera aproximación

Por un lado, según se ha definido anteriormente, el comportamiento del puntal con limitadores de carga instalados debe ser idéntico o muy similar al comportamiento del puntal sin limitadores para el caso de cargas reducidas (hasta la carga límite). Por otro lado, al tratarse de un sistema tipo pórtico, los limitadores de carga presentan un funcionamiento fundamentalmente a flexión. Consecuentemente se necesita de una gran rigidez a flexión en los limitadores de carga con el objetivo de no afectar al comportamiento del puntal hasta la carga límite de diseño.

Para conseguir esta gran rigidez a flexión, y tras las primeras simulaciones numéricas realizadas (las consideraciones relativas al modelo de elementos finitos serán detalladas posteriormente), fue necesaria la consideración de espesores de varios milímetros. Estos elevados espesores, unidos a las pequeñas dimensiones de los limitadores de carga, desaconsejaban la materialización de secciones débiles cuyo objetivo era el de localizar la aparición de rótulas plásticas que desestabilizaran el sistema estructural a la carga límite de diseño. En la Fig. 4.7 se observa la geometría sobre la que se trabajó en la primera aproximación al diseño. Aunque no se materializan las secciones débiles, la posición de las rótulas plásticas debe estar localizada igualmente en el centro y las esquinas superiores del limitador de carga.

Para analizar correctamente el comportamiento de los limitadores de carga mediante simulación numérica es necesaria la consideración de, al menos, los elementos que interactúan directamente sobre los limitadores. De lo contrario no es posible modelizar de forma adecuada las condiciones de contorno de dichos limitadores. Los elementos que están en contacto directo con el limitador de carga son el pasador y la campana. El conjunto pasador-limitador-campana se consideró adecuado para analizar el comportamiento micro-escala de los limitadores de carga instalados en puntales. En la Fig. 4.8 se muestra una vista en planta (Fig. 4.8a) y una vista en 3D

(Fig. 4.8b) de este conjunto. Cabe resaltar que, dado que la geometría de la campana es circular, se añadieron cuñas (círculos de color rojo en la Fig. 4.8) a los limitadores de carga para aumentar la superficie de contacto entre los limitadores y la campana.

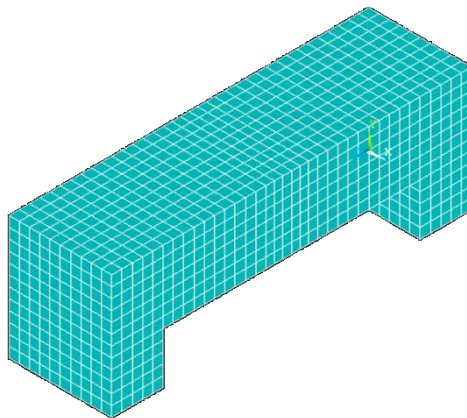


Fig. 4.7. Primera aproximación al diseño de limitadores de carga.

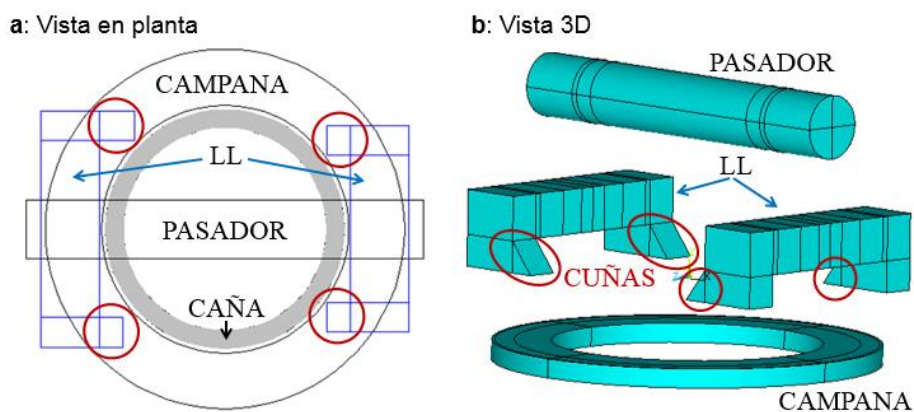


Fig. 4.8. Conjunto formado por pasador-limitador-campana: (a) vista en planta y (b) vista 3D.

El análisis detallado del comportamiento de este conjunto se realizó mediante simulación numérica [107] con las siguientes consideraciones:

1. **Tipo de elementos empleados:** Se utilizan elementos tipo SOLID186 [107] cúbicos de 20 nodos (nodos en las esquinas y en la posición intermedia de cada una de las aristas) con 3 grados de libertad por nodo correspondientes a los desplazamientos en los tres ejes (U_x , U_y y U_z). Este es uno de los elementos más precisos dentro de la librería de ANSYS [107] por ser un tipo SOLID y presentar un número elevado de nodos. También es uno de los elementos con mayor coste computacional que, en este caso, su utilización

no carece de sentido por tratarse de un micro-modelo. La Fig. 4.9 muestra la geometría del elemento considerado. Permite, además, incorporar las distintas características que se detallan a continuación.

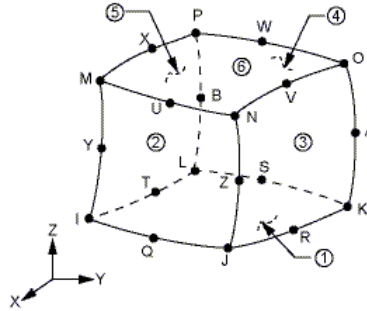


Fig. 4.9. SOLID186 [107].

2. **Comportamiento del material:** Para los primeros modelos, con el objetivo de obtener una primera respuesta de los limitadores de carga, se consideró un comportamiento simplificado. El material acero de los limitadores de carga tiene un comportamiento tenso-deformacional sencillo, con una primera rama elástica hasta la tensión de plastificación, y un comportamiento plástico posterior con rama de endurecimiento. De forma simplificada, distintas normativas [108,109] proponen adoptar un comportamiento elasto-plástico perfecto para el acero, con un módulo de elasticidad (E_s) de 210GPa. En este trabajo se consideró un valor muy pequeño de la pendiente (E_s') de la rama plástica ($E_s' = E_s/10.000$) que no afecta a los resultados obtenidos y evita fallos de convergencia durante el cálculo de los modelos. La Fig. 4.10 muestra la definición del comportamiento tenso-deformacional introducido en los modelos. El acero del pasador y la campana para el que no se alcanzan las tensiones de plastificación se consideró elástico y lineal con un módulo de elasticidad de 210GPa.

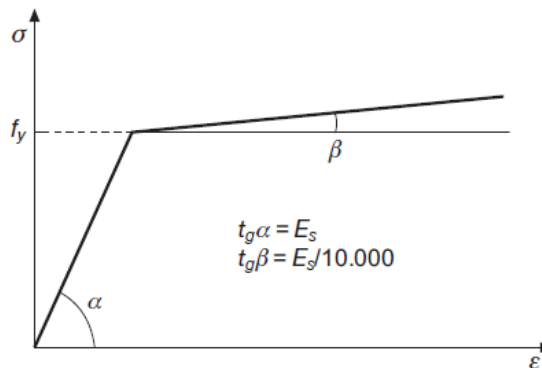


Fig. 4.10. Comportamiento tenso-deformacional del acero utilizado para los limitadores.

3. Condiciones de simetría: Tanto la aplicación de carga como la geometría del modelo propuesto presentan un doble eje de simetría. Con el objetivo de reducir el coste computacional se modelizó tan solo una cuarta parte del modelo. En los planos o cortes de simetría deben impedirse los desplazamientos en dirección perpendicular a estos cortes para cumplir con las condiciones de simetría. En el plano $Z = 0$ y $X = 0$ se impusieron desplazamientos en Z y X igual a 0 respectivamente (véase Fig. 4.13). En la Fig. 4.11 se muestra el cuarto de modelo considerado.

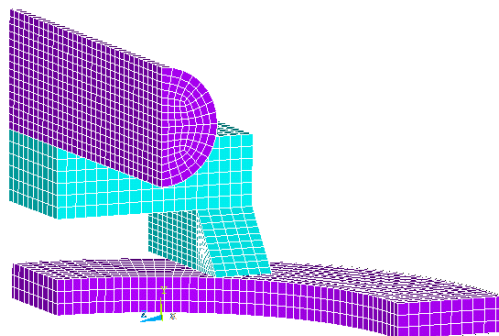


Fig. 4.11. Cuarto de modelo considerado.

4. Mallado: El mallado adoptado en la Fig. 4.11 ha sido el resultado de un análisis de sensibilidad realizado con el tamaño de malla, mostrando resultados adecuados con un coste computacional comedido.
5. Contactos: Se han modelizado dos contactos acero-acero de distintos elementos del modelo. Por una parte, el contacto entre el pasador y el limitador de carga. Por otra, el contacto entre el limitador de carga y la campana. Se han utilizado los elementos TARGE170 y CONTA174 de la librería de ANSYS [107] para crear las superficies de contacto. Ambos elementos deben definirse para una misma superficie de contacto. El elemento TARGE170 se definió para la superficie del elemento inferior del contacto (limitador o campana respectivamente) y el elemento CONTA174 para la superficie del elemento superior del contacto (pasador o limitador respectivamente). Son elementos superficiales de 4 nodos, con 3 grados de libertad por nodo (U_x , U_y y U_z), que utilizan el método Lagrangiano de resolución (Augmented Lagrangian Algorithm). Permiten además la separación, pero no la penetración de un elemento dentro de otro. El deslizamiento está también permitido, siendo necesario el valor del coeficiente de rozamiento. El valor del coeficiente de rozamiento entre aceros depende en gran medida del estado de las superficies (corrosión, deterioración, tratamientos superficiales) y de las condiciones de las mismas (humedad sobre todo) [110]. Se adoptó un valor de 0.6 [110,111] como valor

intermedio y generalmente aceptado. Sin embargo, la incertidumbre asociada a este parámetro fue estudiada con tal de poder analizar su influencia y cómo afecta al diseño de los limitadores de carga. Los resultados y las conclusiones obtenidas se mostrarán al final de este subapartado. La Fig. 4.12 muestra los contactos en el modelo considerado.

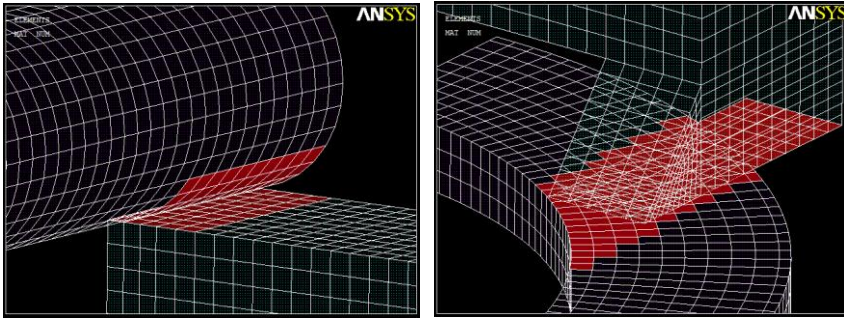


Fig. 4.12. Contactos: pasador-limitador (izquierda) y limitador-campana (derecha).

6. Condiciones de contorno: La campana en los puntales tiene coartados los desplazamientos en el plano horizontal, tanto por la rosca como por la caña. Consecuentemente se consideran impedidos todos los desplazamientos horizontales (U_x y U_z) de la parte inferior de la campana. Además, la rosca proporciona la función de soporte vertical de la campana en una zona perimetral concreta. En esta zona (véase Fig. 4.13) se impiden los desplazamientos en dirección vertical (U_y).

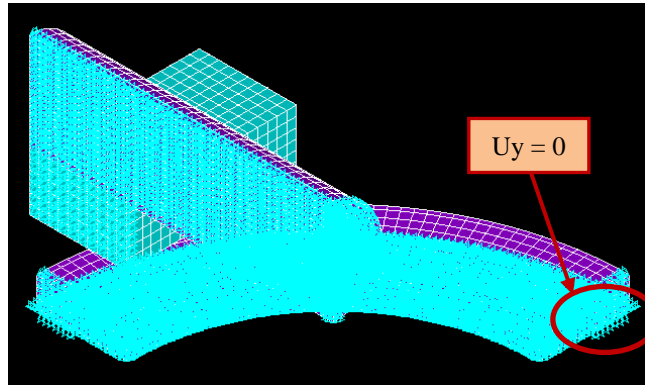


Fig. 4.13. Zona de la campana donde se impiden los desplazamientos verticales.

7. Resolución del problema:
 - Aplicación de la carga: En un puntal, la carga viaja a través de la caña y se transmite al pasador en las zonas que está en contacto directo con la caña, es decir, en aquellas zonas del pasador que quedan dentro de los orificios de la caña y que contactan con esta.

Ante un comportamiento no-lineal, como el considerado en este modelo para el limitador, en el que se quiere obtener la respuesta plástica del sistema, se debe aplicar un control por deformación. El control por deformación consiste, en este caso, en la aplicación sucesiva (pasos de carga) de desplazamientos verticales descendentes muy pequeños en los nodos donde se aplicaría la carga. Controlando las reacciones verticales en la base de la campana, y multiplicándolas por 4, se obtendría la carga del puntal en cada uno de los pasos de carga. De esta forma es posible conocer cuál es la carga equivalente al desplazamiento impuesto en cada uno de los pasos de carga, y cómo se comporta el sistema con el limitador de carga introducido para cualquier valor de carga.

- Tipo de cálculo: Se realiza un cálculo estático con distintos pasos de carga para conocer la respuesta del modelo en función del nivel de carga aplicado. Se considera además la no-linealidad geométrica con el objetivo de establecer el equilibrio en cada iteración en la posición deformada de los elementos.
- Método de resolución: El algoritmo de resolución es el Newton-Raphson no-simétrico (UNSYM [107]) debido a la asimetría de la matriz de rigidez al introducir el rozamiento de las superficies de contacto.

Tras los primeros resultados obtenidos se puede observar en la Fig. 4.14 como el posicionamiento de las rótulas plástica se localiza en las posiciones esperadas.

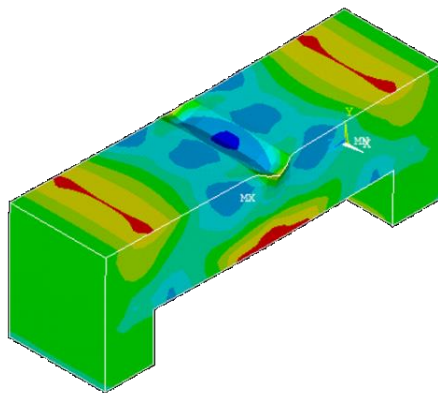


Fig. 4.14. Primeros resultados. Tensiones de tracción, representadas en rojo, y de compresión, en azul.

Además, el funcionamiento fue el deseado, con un comportamiento muy similar al de un puntal sin limitadores de carga bajo el comportamiento elástico del limitador, y un comportamiento perfectamente plástico al nivel de la carga de diseño. Dicho comportamiento se puede observar en el gráfico carga-desplazamiento de la Fig. 4.15. En esta figura se ha representado el comportamiento elástico y lineal de un

puntal de referencia, y el comportamiento de los puntales con los limitadores de carga instalados. Para estos últimos se ha sumado el desplazamiento obtenido del modelo realizado al desplazamiento del puntal de referencia. Además, y como también muestra esta figura, se detectó una elevada influencia del coeficiente de rozamiento, sobre todo en la carga límite de diseño del limitador de carga. Para un aumento del coeficiente de rozamiento desde un valor de 0.60 a un valor de 0.75 (25%), la carga límite del mismo limitador de carga aumentó, de los 17.6kN a los 18.5kN (5%). Esta elevada influencia es debida al funcionamiento de los limitadores en un sistema tipo pórtico y a las condiciones de apoyo de los limitadores en la campana. En el momento en el que el limitador empieza a deformarse, los dos tabiques verticales del mismo tienden a abrirse, deslizando sus partes inferiores sobre la campana y movilizand la fuerza de rozamiento entre estos dos elementos.

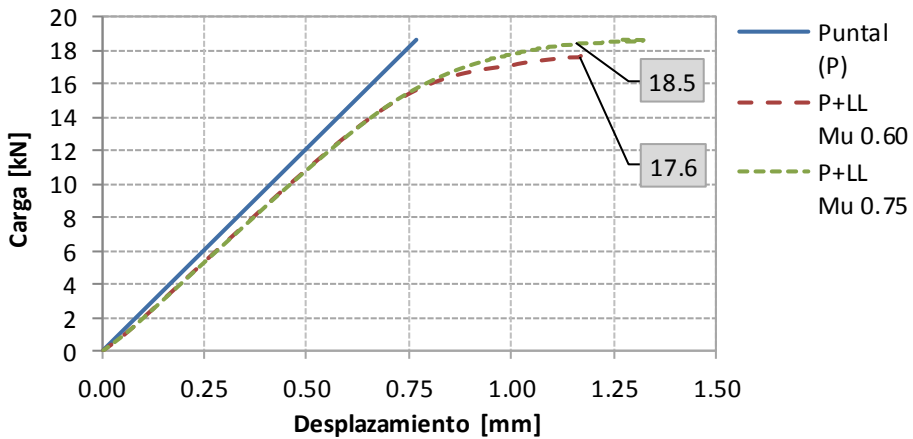


Fig. 4.15. Curvas de comportamiento Carga-Desplazamiento para el análisis de la influencia del rozamiento entre limitador (primera aproximación) y campana.

Estas diferencias en la carga límite de diseño de un mismo limitador de carga son inadmisibles. La variabilidad del coeficiente de rozamiento puede ser muy elevada y el objetivo es diseñar limitadores de carga con una carga límite de diseño muy precisa, que permita ajustar la carga que reciban los puntales a un valor conocido, independientemente de las condiciones de rozamiento entre el limitador y la campana.

4.2.2.2. Segunda aproximación

Vista la necesidad de concebir un diseño que no depende de la influencia del coeficiente de rozamiento entre el limitador y la campana, como segunda aproximación se propuso la materialización de una fijación o empotramiento de la parte inferior de los tabiques del limitador. Con esta fijación se evitaría la apertura de los tabiques cuando se aplica la carga. Como solución se planteó la disposición

de una pletina que funciona como un tirante (T) en la parte inferior del limitador, tal y como se muestra en el modelo de la Fig. 4.16.

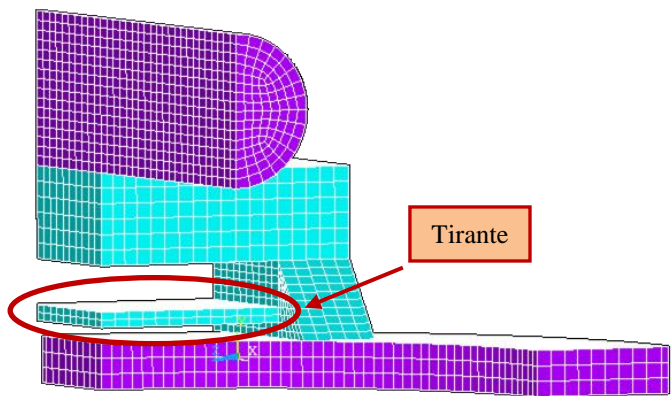


Fig. 4.16. Solución con tirante en el limitador.

Representando otra vez la respuesta Carga-Desplazamiento de este nuevo planteamiento de limitador de carga, en la Fig. 4.17 se puede observar cómo, esta vez sí, la carga límite es idéntica con independencia del coeficiente de rozamiento adoptado.

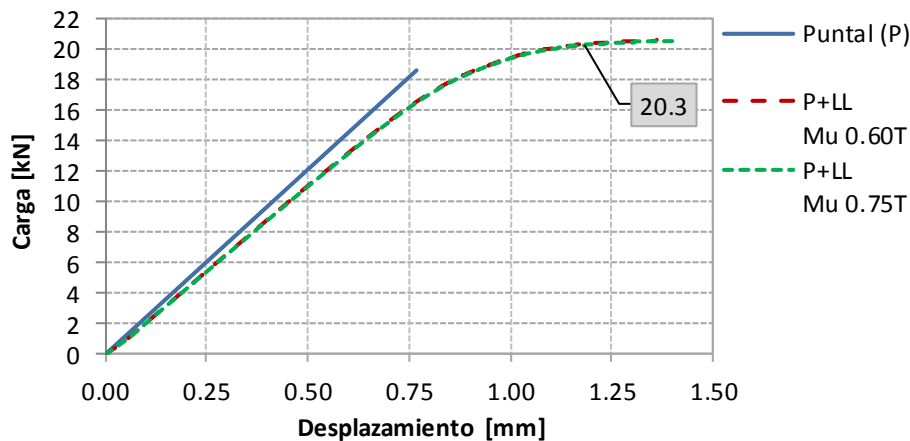


Fig. 4.17. Curvas de comportamiento Carga-Desplazamiento para el análisis de la influencia del rozamiento entre limitador (segunda aproximación) y campana.

También se puede observar en la Fig. 4.17 que, al limitar la apertura de los tabiques, la carga límite de diseño de un limitador con las mismas características mecánicas y geométricas es ligeramente superior.

En resumen, la solución planteada como segunda aproximación presenta un concepto acertado, aunque su diseño todavía puede ser mejorado para adecuarse de mejor forma a la geometría del puntal.

4.2.2.3. Tercera aproximación

La geometría de un puntal es generalmente circular. Un diseño como el planteado en el anterior apartado presenta como principal limitación el deficiente apoyo del limitador en la campana. Para mejorar esta limitación, se propuso dotar al limitador de carga de una geometría circular para adecuarse a las características geométricas del puntal tomado como referencia. Evidentemente, para otros tipos de puntales, se puede mantener el concepto y tan solo modificar su geometría.

En la Fig. 4.18 se muestra el nuevo planteamiento sin la disposición del tirante inferior. De esta forma se evitan las cuñas de los limitadores de carga y el deficiente apoyo que presentaba el anterior concepto de limitador de carga. En esta solución, todo el limitador de carga aparece apoyado en la campana.

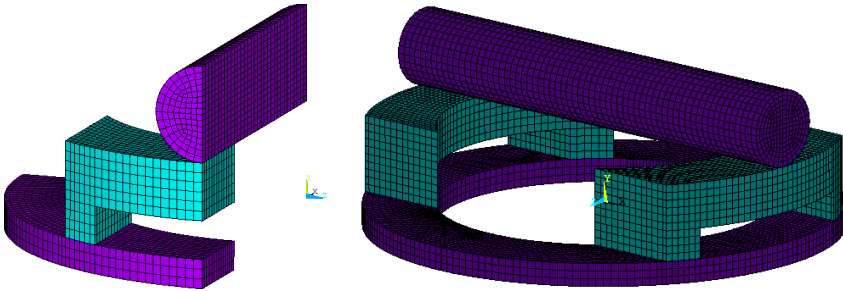


Fig. 4.18. Limitador de carga (tercera aproximación) con geometría circular: 1/4 de modelo (izquierda) y geometría completa (derecha).

Para la disposición del tirante inferior en esta nueva aproximación se propusieron distintas alternativas (véase Fig. 4.19):

- Alternativa 1: Solución con tirante, pero esta vez adecuado a la nueva geometría circular.
- Alternativa 2: Solución con pared lateral que, con una alta precisión en el contacto con el limitador, impida la apertura de los tabiques del mismo.
- Alternativa 3: Solución con embutición de alta precisión del limitador de carga en la campana.

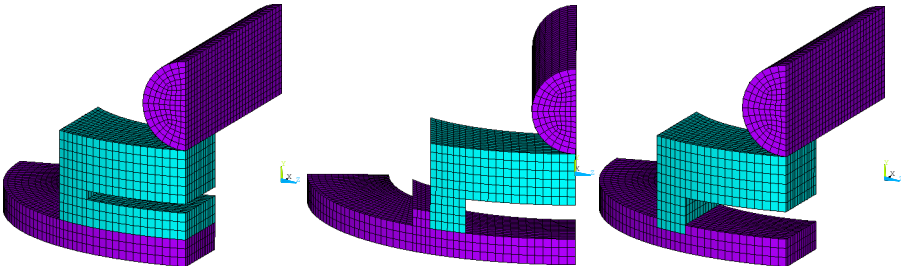


Fig. 4.19. De izquierda a derecha: Solución con tirante adecuado a la nueva geometría circular (alternativa 1), con paredes verticales (alternativa 2) y con embutición en la campana (alternativa 3).

Antes de continuar con el estudio en paralelo de las tres alternativas, se analizó si todas ellas eran viables, desde los puntos de vista económico y de fabricación. A nivel prototipo, la fabricación de las distintas alternativas se iba a realizar por mecanizado en una empresa de matricería de acero. Realizada una consulta técnica a una de las principales empresas de matricería que colabora con asiduidad con el ICITECH (centro de adscripción donde se ha llevado a cabo la realización de este trabajo), se descartó desde un primer momento la alternativa 3. Presentaba dos serias limitaciones. Por un lado, el coste de esta alternativa sería desmesurado por las elevadas exigencias de precisión que debía presentar las hendiduras a realizar sobre las campanas. Por otro, la instalación de los limitadores de carga en unas hendiduras tan ajustadas no sería una tarea sencilla, afectando gravemente al rendimiento en el posicionamiento de los limitadores por parte de los operarios. Cabe recordar que uno de los requisitos esenciales de los limitadores de carga se basa en su sencillez de aplicación, para no afectar a los rendimientos actuales en obra e imputar sobrecostes que descartarían su aplicación. Consecuentemente, el análisis de las distintas alternativas realizado a continuación se restringe a las alternativas 1 y 2.

4.2.2.4. Solución final. Accesorios, DOE y elección de prototipos

El diseño de experimentos (DOE por sus siglas en inglés) es una técnica ampliamente utilizada en el sector industrial [112–124] para el diseño de piezas. Mediante la aplicación de esta técnica se definen qué parámetros o características son modificables y el intervalo de variación de cada uno de ellos, para que con la simulación de un número reducido de modelos se consiga la respuesta de todas las posibles soluciones existentes.

Antes de iniciar el diseño final de los limitadores de carga mediante el DOE, se definieron una serie de accesorios imprescindibles para su correcto funcionamiento.

En primer lugar, es necesario que el pasador quede fijado en el centro del limitador de carga por razones obvias: su comportamiento a flexión ocurre solo si la carga está centrada y debe permitirse el movimiento de ajuste del puntal al girar la rosca sin desinstalar el limitador de carga. Se plantearon también dos alternativas, según se muestra en la Fig. 4.20, con un albergue en la parte superior materializado con dos pequeños tabiques o con un albergue de forma que el pasador se embeba pocos milímetros en el limitador. Consultadas ambas opciones con la matricería, la primera opción quedó descartada por su mayor coste y dificultad.



Fig. 4.20. Boceto del albergue del pasador según la solución arriba del limitador (izquierda) o embebido en el limitador (derecha).

En segundo lugar, y con el objetivo de aumentar el rendimiento de los operarios en su colocación, se planteó también la necesidad de colocar de forma simultánea el par de elementos que forman el limitador de carga. Así, de esta forma, unidos por una especie de alambre elástico, ambos elementos quedan unidos sin interacción mecánica alguna para permitir su colocación de forma simultánea. Este accesorio no se considera en los modelos numéricos realizados debido a su nula afección en los resultados. En la Fig. 4.21 se muestra de forma esquemática la solución planteada.

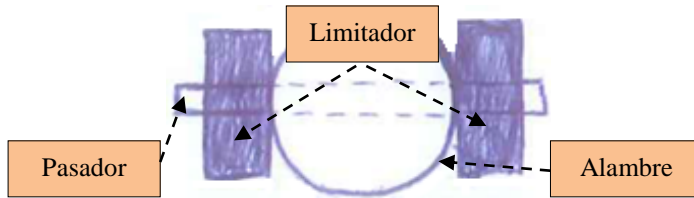


Fig. 4.21. Boceto del detalle de solución para colocación simultánea del par de elementos de los limitadores de carga.

Una vez definida, en líneas generales, la geometría del limitador de carga que se pretende fabricar (véase **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), se realizó el DOE con ayuda de Statgraphics [125] para obtener todas las posibles soluciones existentes con el cálculo tan solo de un número reducido de modelos.

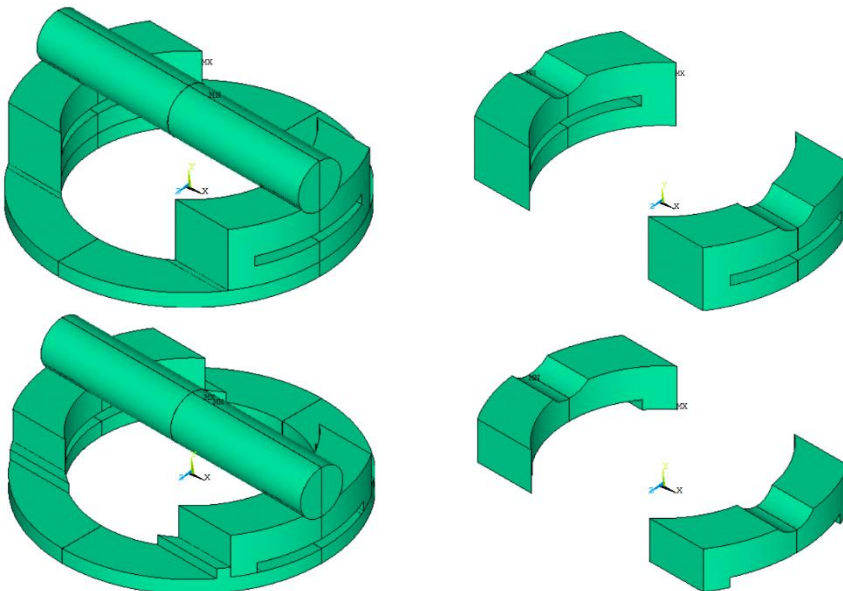


Fig. 4.22. Solución definitiva sobre la que se aplica el DOE con el detalle del albergue del pasador embebido en el limitador: solución con tirante (arriba) y con paredes verticales (abajo).

Para ello, y como se ha comentado, es necesario establecer como primer paso qué parámetros se van a considerar como modificables y cuál es el intervalo de variación

de dichos parámetros. Se han clasificado los distintos parámetros geométricos y mecánicos del limitador de carga en función de si son o no modificables:

- Parámetros no modificables (adoptan valores fijos para cualquier solución):
 - El radio interior y exterior que forman la geometría circular, y el radio de la hendidura para alojar el pasador, dependen de los componentes del puntal (caña y pasador respectivamente) en el que va instalado el limitador de carga.
 - El ancho de cada una de las piezas metálicas se define en función de la dimensión radial de la superficie plana de la campana para que el apoyo del limitador de carga en esta pieza sea estable.
 - La longitud de cada pieza metálica se establece mediante una solución de compromiso que permita un correcto comportamiento a flexión de la chapa horizontal superior (máxima longitud) y, a ser posible, un comportamiento fundamentalmente bidimensional de esta flexión (mínima longitud).
 - Con el fin de reducir el número de variables, para este estudio se escogió un acero de calidad 275 (límite elástico, f_y , de 275MPa). Evidentemente, si se utiliza un acero de mayor calidad, menores serán los espesores necesarios, aunque menor también será la rigidez a flexión del limitador de carga en su rama inicial elástico y lineal. Algunas consideraciones adicionales se realizan en el apartado “4.4. Ensayo” de este capítulo.
- Parámetros modificables (3 variables para cada alternativa) para los que se realizará el DOE con el objetivo de conocer todas las soluciones existentes:
 - Alternativa con tirante:
 - Espesor de la chapa metálica horizontal superior (o dintel) entre 4mm y 8mm.
 - Espesor de los tabiques entre 2mm y 6mm.
 - Espesor de la chapa metálica horizontal inferior (o tirante) entre 2mm y 4mm.
 - Alternativa con paredes:
 - Espesor de la chapa metálica horizontal superior (o dintel) entre 4mm y 8mm.
 - Espesor de los tabiques entre 2mm y 6mm.
 - La altura del hueco, que queda entre el limitador y la campana (o entre las dos chapas horizontales para la alternativa anterior), entre 1mm y 2mm. Esta altura es una medida de seguridad. Como se ha comentado, esta pieza es capaz de, llegada a su carga límite, mantener esta carga límite a la vez que desciende o se deforma. La altura máxima de descenso permitido se corresponde con la altura del hueco y se elige en función de la máxima deformación

adicional que se puede permitir en un elemento constructivo (forjado) debido a limitar la carga que puede absorber un puntal. En el caso de agotar la altura máxima establecida, y por tanto la chapa horizontal superior toca en la parte inferior, el puntal seguiría absorbiendo carga hasta la rotura del mismo. Supone, por tanto, una medida de seguridad adicional para evitar deformaciones excesivas en el forjado debidas a la presencia del limitador de carga. Solo se considera la altura del hueco en esta alternativa para poder estudiar su influencia sin considerar una cuarta variable adicional en la anterior alternativa, en la que se considera una altura fija de 2mm.

El siguiente paso en el DOE consiste en seleccionar las respuestas buscadas, es decir, qué buscamos como resultado de este diseño de experimentos. En el caso analizado, las respuestas consisten en la carga límite del limitador de carga y en si se produce el no deseado deslizamiento del limitador sobre la campana.

A continuación, se define el método estadístico que se utiliza para determinar el muestreo de las soluciones que se van a calcular. Este muestreo debe permitir, posteriormente, poder obtener los resultados por interpolación de cualquier otra solución existente dentro de los intervalos de variación definidos. Para variables continuas, como las definidas, existen diversos tipos de análisis. En este diseño se ha escogido la metodología por superficies de respuesta con un diseño de compuesto central (2^3 +estrella [125]), rotatable, con dos puntos estrella de ubicación aleatoria. El diseño de experimentos mediante superficies de respuesta debe considerar al menos tres niveles de los factores (en este caso tres más los dos niveles estrella), y estos deben ser continuos como los considerados. La Tabla 4.1 y la Tabla 4.2 presentan el diseño de experimentos resultante para cada uno de los casos (con tirante y paredes verticales). El análisis se realizó considerando las interacciones simples en un modelo de respuesta cuadrático.

Una vez realizado el diseño de experimentos se calcularon los 32 (16+16) modelos numéricos empleando ANSYS [107]. Los resultados obtenidos en términos de carga límite e influencia del deslizamiento se presentan en la Tabla 4.3.

A la vista de estos primeros resultados, el deslizamiento se produce, en el caso de la solución con tirante, para espesores del tirante iguales o inferiores a los 2mm cuando el espesor de los tabiques es elevado. También aparece cuando el espesor del tirante es de 3mm en el caso en el que tanto el espesor de los tabiques como el espesor del dintel son elevados. Para evitar este deslizamiento sería necesario al menos disponer de un espesor del tirante de 3mm. El deslizamiento se produce, en el caso de la solución con paredes verticales, cuando existe una combinación de espesores elevados del dintel y de los tabiques.

Tabla 4.1. Diseño de experimentos correspondiente a la solución con tirante. Unidades en mm.

Modelo	Espesor dintel	Espesor tabiques	Espesor tirante
01	8.0	2.0	2.0
02	4.0	2.0	2.0
03	9.7	4.0	3.0
04	3.0	4.0	3.0
05	6.0	4.0	1.3
06	4.0	6.0	4.0
07	4.0	6.0	2.0
08	6.0	4.0	3.0
09	4.0	2.0	4.0
10	8.0	2.0	4.0
11	8.0	6.0	2.0
12	8.0	6.0	4.0
13	6.0	1.0	3.0
14	6.0	6.0	3.0
15	6.0	2.0	3.0
16	6.0	4.0	4.7

Tabla 4.2. Diseño de experimentos correspondiente a la solución con paredes verticales. Unidades en mm.

Modelo	Espesor dintel	Espesor tabiques	Altura
01	6.0	4.0	2.3
02	8.0	6.0	2.0
03	8.0	6.0	1.0
04	6.0	6.0	1.5
05	6.0	4.0	0.7
06	8.0	2.0	1.0
07	4.0	2.0	1.0
08	4.0	6.0	2.0
09	6.0	1.0	1.5
10	9.4	4.0	1.5
11	4.0	6.0	1.0
12	8.0	2.0	2.0
13	6.0	4.0	1.5
14	3.0	4.0	1.5
15	6.0	2.0	1.5
16	4.0	2.0	2.0

Tabla 4.3. Diseño de experimentos correspondiente a la solución con paredes verticales.

Solución con tirante			Solución con paredes verticales		
Modelo	Carga límite [kN]	¿Desliza?	Modelo	Carga límite [kN]	¿Desliza?
01	18.5	NO	01	16.5	NO
02	6.8	NO	02	25.8	SI
03	30.0	NO	03	25.0	SI
04	6.0	NO	04	16.5	SI
05	15.8	SI	05	15.0	SI
06	10.3	NO	06	22.5	NO
07	9.8	SI	07	6.8	NO
08	17.0	NO	08	9.0	NO
09	6.8	NO	09	12.0	NO
10	18.5	NO	10	31.5	NO
11	25.5	SI	11	8.0	NO
12	28.5	NO	12	22.8	NO
13	10.0	NO	13	15.5	SI
14	19.5	SI	14	5.0	NO
15	12.8	NO	15	13.8	NO
16	17.0	NO	16	6.9	NO

Continuando con el análisis de resultados según el diseño de experimentos planteado en Statgraphics [125], para el caso con tirante, el modelo de respuesta obtenido a partir de los 16 modelos calculados presenta un R-cuadrado del 98.6%, lo que implica un ajuste muy elevado del modelo estadístico que permitirá: a) analizar la influencia significativa de cada parámetro; y b) interpolar y conocer los resultados de cualquier otra solución no calculada. En la Fig. 4.23, los resultados muestran (la línea vertical azul representa el efecto estandarizado a partir del que se considera significativo un factor) que solo existen dos factores significantes para la carga límite, el espesor del dintel o chapa horizontal superior y el espesor de los tabiques, así como su interacción.

El factor que más influencia tiene en la carga límite es el espesor del dintel o de la chapa superior. En la Fig. 4.24 se observa la influencia cuantitativa de cada uno de los factores en el valor de la carga límite. El modelo de respuesta ajustado permite también obtener superficies de respuesta, o curvas de diseño, en las que rápidamente se puede escoger el diseño de un limitador de carga con tirante sin necesidad de realizar más modelos numéricos. En la Fig. 4.25 se muestran, como ejemplo, las curvas de diseño para la solución con tirante, con un tirante de 3mm de espesor.

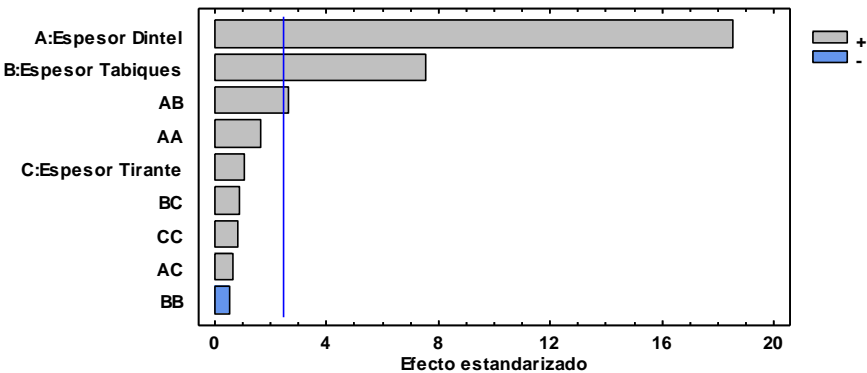


Fig. 4.23. Efecto de cada uno de los factores e interacciones sobre la carga límite en el caso de limitadores con tirante.

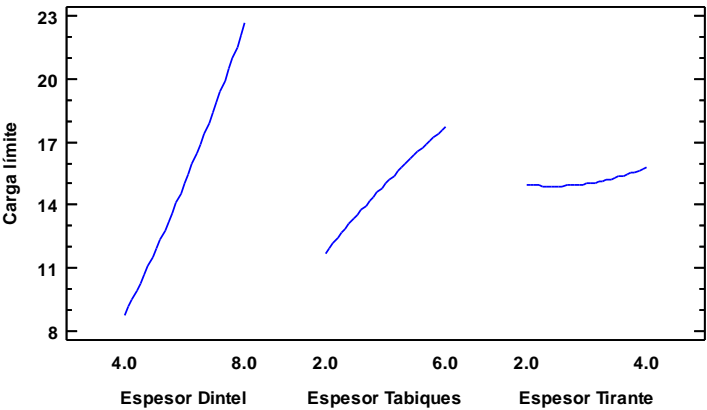


Fig. 4.24. Efecto cuantitativo de cada uno de los factores sobre la carga límite en el caso de limitadores con tirante.

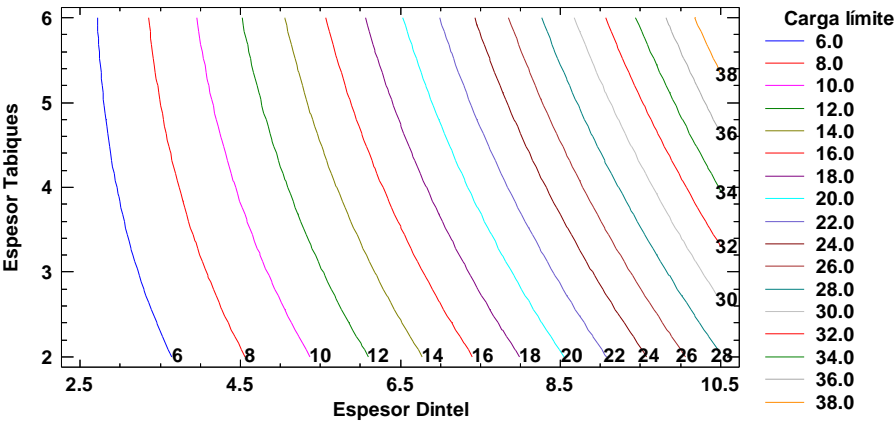


Fig. 4.25. Curvas de diseño para la solución de limitadores con tirante de 3mm de espesor.

Para el caso con paredes verticales, el modelo de respuesta obtenido a partir de los 16 modelos calculados presenta un R-cuadrado del 99.9%, lo que implica un ajuste muy elevado del modelo estadístico que, de la misma forma, permitirá: a) analizar la influencia significativa de cada parámetro; y b) interpolar y conocer los resultados de cualquier otra solución no calculada. Los resultados muestran (Fig. 4.26) que los tres factores son factores significantes para la carga límite, así como algunas de sus interacciones. Sin embargo, el factor que más influencia tiene en la carga límite, con una amplia diferencia sobre el resto, es el espesor del dintel o de la chapa superior.

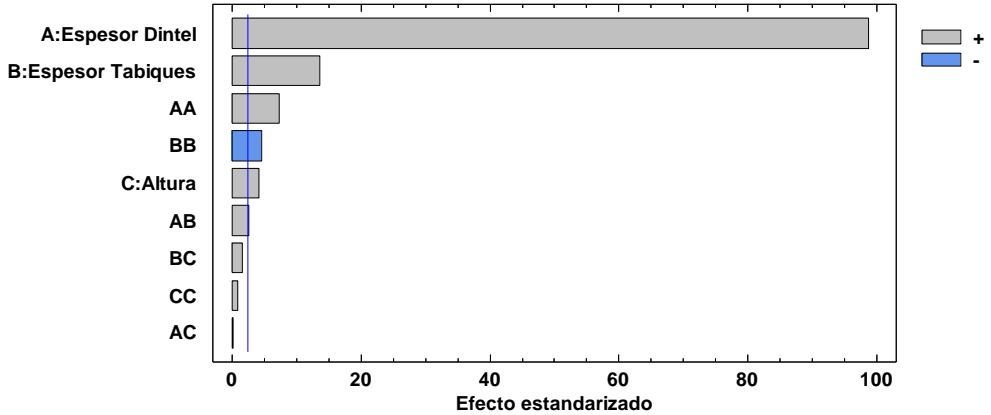


Fig. 4.26. Efecto de cada uno de los factores e interacciones sobre la carga límite en el caso de limitadores con paredes verticales.

En la Fig. 4.27 se observa la influencia cuantitativa de cada uno de los factores en el valor de la carga límite.

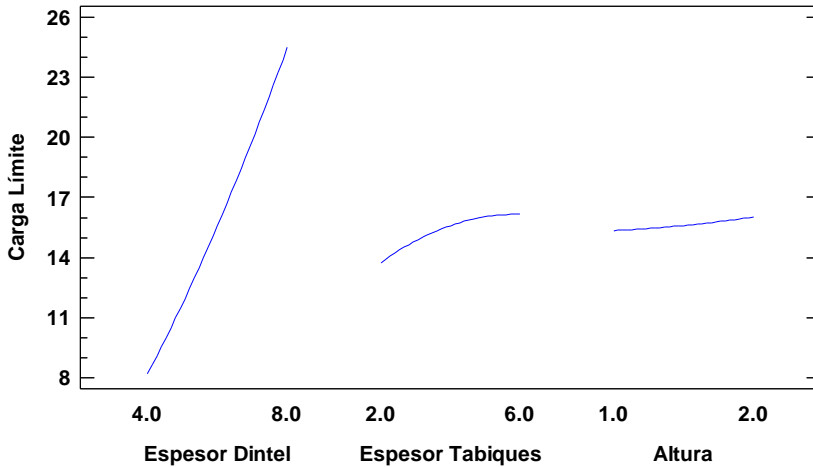


Fig. 4.27. Efecto cuantitativo de cada uno de los factores sobre la carga límite en el caso de limitadores con paredes verticales.

En la Fig. 4.28 se muestran, como ejemplo, las curvas de diseño para la solución con paredes verticales, con una altura de 2mm, en las que rápidamente se puede escoger el diseño de un limitador de carga con paredes verticales sin necesidad de realizar más modelos numéricos.

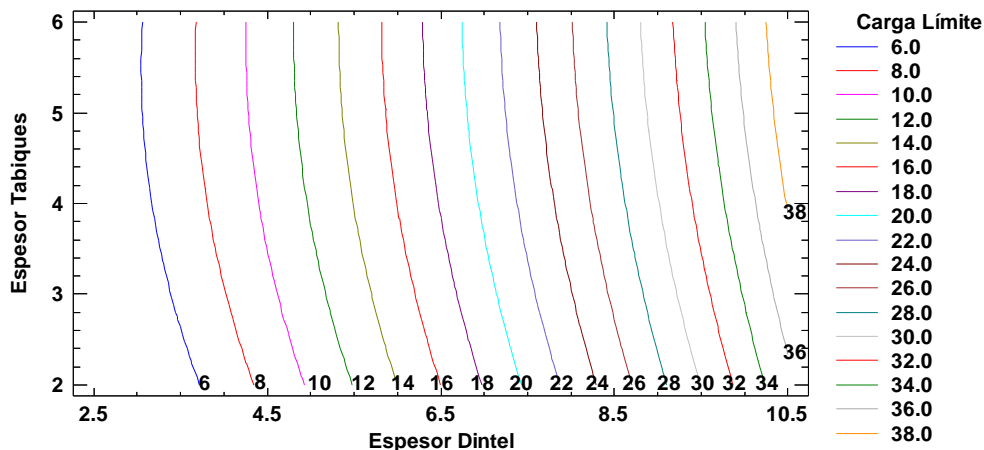


Fig. 4.28. Curvas de diseño para la solución de limitadores con paredes verticales y 2mm de altura.

Finalmente, tras el diseño, se decidió fabricar un primer lote de limitadores de carga (Lote 01) de los distintos diseños:

- L01-A: 5 limitadores con tirante y con una carga límite teórica de 14kN, 4.0mm de espesor de los tabiques, 3.0mm de espesor del tirante y 5.3mm de espesor del dintel (la altura del hueco se mantuvo en 2.0mm).
- L01-B: 5 limitadores con paredes verticales y con una carga límite teórica de 14kN, 4.0mm de espesor de los tabiques, 2.0mm de altura y 5.5mm de espesor del dintel.

En los siguientes sub-apartados se describe el proceso de fabricación y los ensayos realizados a los limitadores de este lote (Lote 01), así como las diversas consideraciones realizadas para la fabricación de otro lote de limitadores, comprobación de su comportamiento y definición y caracterización simplificada de los limitadores de carga en simulaciones numéricas macro-escala, como puede ser el caso de estructuras completas de edificios durante su construcción.

4.3. Fabricación

Existen diversos procedimientos de fabricación de los limitadores de carga. A nivel prototipo fue escogida la fabricación por mecanizado en la matricería que prestó asesoramiento en el diseño (Matricería Palanca, S.L.). La fabricación por mecanizado de los limitadores de carga engloba las siguientes fases, en las que la precisión de fabricación es de 1 centésima de milímetro:

- Pulido y preparación de las superficies del material primario (acero S275 JR) adquirido en forma de lingotes (Fig. 4.29).



Fig. 4.29. Pulido y preparación de las superficies de los lingotes de acero.

- Primer mecanizado del lingote mediante máquina con control numérico.
 - Órdenes numéricas y posicionamiento de los lingotes (Fig. 4.30).

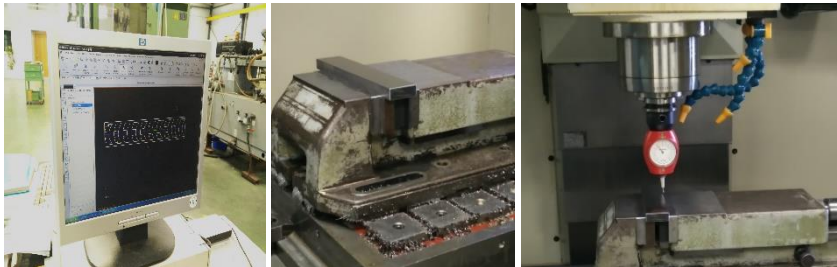


Fig. 4.30. Control numérico y posicionamiento de los lingotes.

- Mecanizado y resultado final (Fig. 4.31).

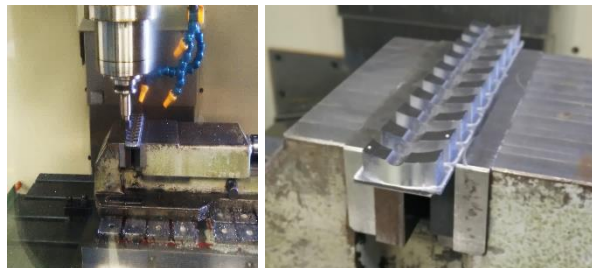


Fig. 4.31. Mecanizado (izquierda) y resultado final (derecha).

- Separación de limitadores de carga y adecuación de su altura total (Fig. 4.32), incluido un refinamiento de las distintas aristas vivas para no provocar cortes durante su utilización.



Fig. 4.32. Separación (izquierda) y adecuación de la altura (derecha) de los limitadores de carga.

- Llegados a este punto, la solución con paredes verticales terminaba con otro mecanizado por control numérico, salvo las campanas que se modificaron para recrear las paredes verticales que debían funcionar como tope para impedir la apertura de los tabiques (véase Fig. 4.33).



Fig. 4.33. Campana modificada para la solución con paredes verticales (izquierda) y limitador de carga posicionado en un puntal (derecha).

- La solución con tirante continuó con la materialización del hueco intermedio con una altura de 2.0mm. El posicionamiento y el taladro para iniciar la materialización del hueco se puede observar en la Fig. 4.34.



Fig. 4.34. Marcaje del posicionamiento del hueco (izquierda) y taladro para iniciar la materialización del hueco.

- Para materializar completamente el hueco se utiliza otra máquina con control numérico, de alta precisión, en la que el útil de corte es un hilo que define con elevada exactitud la geometría buscada (véase Fig. 4.35).



Fig. 4.35. Materialización completa del hueco en la solución del limitador con tirante.

- Por último, para las dos soluciones, con tirante y paredes verticales, los limitadores de carga se terminan con un chorro de aire y arena que proporcionan el aspecto definitivo (véase Fig. 4.36).



Fig. 4.36. Máquina para el chorro de aire y arena (izquierda) y aspecto definitivo del limitador con tirante.

Generalmente, y por motivos económicos, la fabricación de los prototipos se realizó sin la incorporación del alambre elástico de unión entre los dos elementos del limitador de carga. Sin embargo, a modo de ejemplo, se fabricó un limitador de carga con este alambre elástico de unión para comprobar su correcto funcionamiento y poder observar el estado final del diseño del prototipo realizado. Este ejemplo se fabricó para la solución de limitador de carga con tirante, tal y como se puede observar de forma aislada e instalado en un puntal en la Fig. 4.37.



Fig. 4.37. Prototipo definitivo con la incorporación del alambre elástico de unión entre los dos elementos del limitador de carga.

4.4. Ensayo

Una vez fabricados los diferentes limitadores de carga se inició la fase de ensayos en las instalaciones del Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón (ICITECH). Esta fase se inició con el ensayo del primer lote de limitadores fabricados, con ensayos bajo la aplicación de cargas monotónicas. Siguió con la fabricación y ensayo de un segundo lote de limitadores, bajo la aplicación de cargas monotónicas y cargas repetitivas. También se realizaron ensayos de control de la calidad del acero empleado en la fabricación de los limitadores de carga. A continuación se detallan todos estos aspectos.

4.4.1. Lote 01. Ensayos monotónicos y caracterización del acero

4.4.1.1. Ensayos

Los ensayos sobre los limitadores de carga se iniciaron inmediatamente después de su fabricación. La caracterización del acero se dejó para una etapa posterior para comprobar que el material aportado era de la calidad demandada ($f_y = 275\text{MPa}$). En esta etapa tan solo se disponía del certificado de calidad del proveedor de acero para asegurar su calidad.

Los limitadores de carga fueron ensayados en condiciones similares a las de trabajo en obra, es decir, instalados en los puntales. Para reproducir este ensayo, los puntales necesarios fueron proporcionados por la empresa Encofrados J. Alsina S.A. La realización del ensayo tomó como referencia, además de las condiciones reales de instalación de los puntales, las prescripciones normativas definidas en la UNE-EN 1065 [126]. Estas prescripciones marcan cómo determinar la carga máxima de rotura de los puntales. En la Fig. 4.38 se observa un extracto de esta norma en la que se define el ensayo en un puntal, como el considerado de referencia en este estudio, bajo la aplicación de una carga excéntrica ($e = 10\text{mm}$), con una rótula en cabeza y un plano inclinado ($\theta = 1^\circ$) en la parte inferior.

La instalación del ensayo puede observarse en la Fig. 4.39 y en la Fig. 4.40. Se utilizó un gato hidráulico de 50kN de capacidad máxima y una célula de carga instalada entre el gato y el puntal. Esta célula de carga se utilizó solamente para corroborar la medida correcta de la carga mediante la instalación de 3 galgas extensométricas (metodología que fue posteriormente ampliamente utilizada en el desarrollo del edificio experimental descrito en el Capítulo 5). Las galgas fueron instaladas de forma equidistante en el perímetro de la base del puntal, con una separación de 120° entre ellas. Se dispusieron 3 galgas para obtener la carga de compresión del puntal a partir del promedio de la deformación obtenida. Esta metodología ha sido ampliamente utilizada y validada [56,79,80] y su instalación se detalla en profundidad en el Capítulo 5.

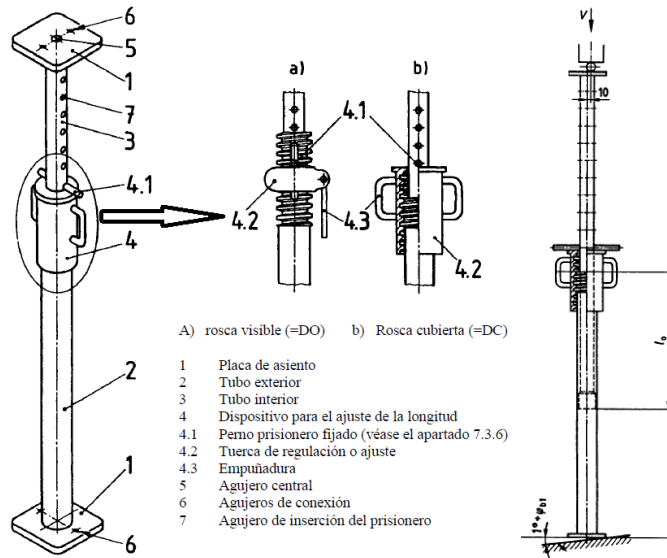


Fig. 4.38. Definición de componentes de un puntal (izquierda) y esquema de ensayo (derecha) propuesto por la UNE-EN 1065 [126].

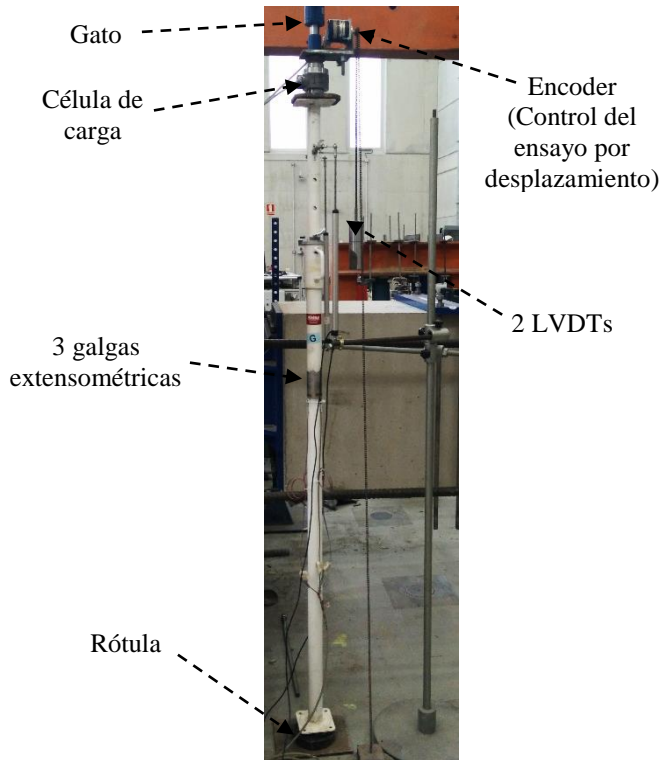


Fig. 4.39. Montaje del ensayo de limitadores de carga instalados en puntales.



Fig. 4.40. Detalle del montaje del ensayo de limitadores de carga instalados en puntales: detalle de los captadores (izquierda), del limitador con tirante (centro) y del limitador con paredes verticales (derecha).

El dispositivo para el control del ensayo por desplazamiento (encoder), del que cuelga una cadena que desciende a medida que se comprime el puntal, fue un dispositivo esencial en el ensayo de limitadores de carga. Este dispositivo permite controlar el ensayo por velocidad de desplazamiento en lugar de velocidad de carga, permitiendo registrar de forma correcta el comportamiento plástico del limitador de carga. Para el registro de su comportamiento, además de la carga medida mediante las 3 galgas extensométricas, se registró el desplazamiento a través de 2 captadores de desplazamiento (LVDT). Por último, en la parte inferior del puntal se dispuso una rótula esférica para reducir las grandes excentricidades que puede llegar a representar la carga de un puntal, siguiendo también las recomendaciones de la UNE-EN 1065 [126]. Aun así, a través del registro de la deformación de la base del puntal mediante 3 galgas extensométricas, se registraron elevadas excentricidades de la carga debido a la inclinación de la placa de asiento superior de los puntales.

Se ensayaron en primer lugar 3 limitadores de carga de cada uno de los diseños. En los primeros ensayos (L01-A1 y L01-B1) no se registró el desplazamiento, representando el gráfico Carga-Tiempo de los dos diseños de limitador de carga en la Fig. 4.41. Como se puede observar, aunque la carga límite teórica de ambos diseños era de 14.0kN, el diseño con tirante presentó una carga límite más elevada (18.0kN) y el diseño con paredes verticales una carga límite inferior (unos 11kN). Consecuentemente, los diseños presentan elevadas diferencias.

Para los dos siguientes ensayos de cada diseño (L01-A2, L01-A3, L01-B2 y L01-B3) se registró además el desplazamiento. Los resultados obtenidos se representan en la Fig. 4.42 y la Fig. 4.43. Los resultados muestran como la carga límite de los limitadores con tirante se mantiene en el mismo valor (18.0kN) para los distintos limitadores, mientras que los limitadores con paredes verticales presentan una gran variabilidad, tanto en carga como en deformación. Se observaron cargas límites de 11kN, 9kN y 12kN para un mismo diseño, con grandes diferencias en la rigidez inicial y el máximo desplazamiento plástico de los limitadores. En todos los diseños, y tras agotar el máximo desplazamiento plástico permitido, se registró un aumento de la rigidez al contacto entre la parte superior de los limitadores de carga y la parte

inferior de los mismos (en el caso del diseño A) o la campana del puntal (en el caso del diseño B). Este mismo comportamiento diferenciado en tres fases (elástico, plástico y rigidización final) se podrá observar en los resultados presentados en este y subsecuentes capítulos.

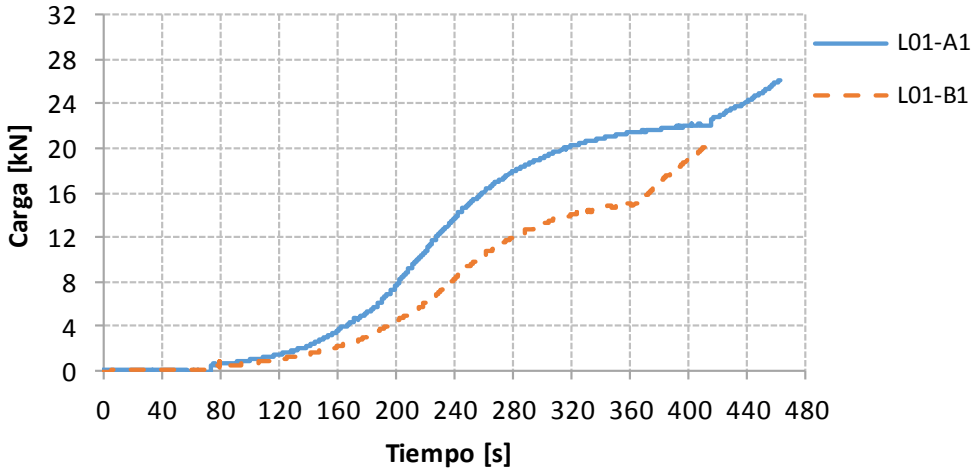


Fig. 4.41. Primeros ensayos sobre el limitador con tirante (L01-A1) y el limitador con paredes verticales (L01-B1) ensayados en puntales.

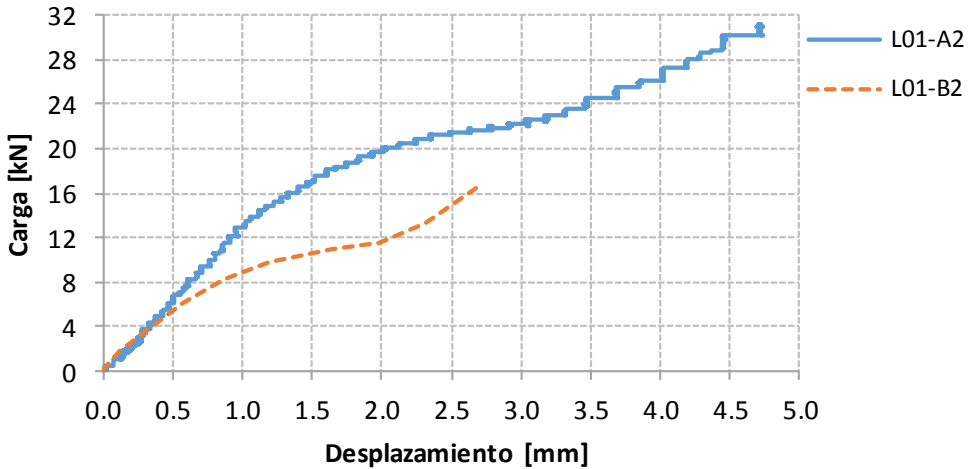


Fig. 4.42. Gráfico Carga-Desplazamiento de los limitadores con tirante (L01-A2) y con paredes verticales (L01-B2) ensayados en puntales.

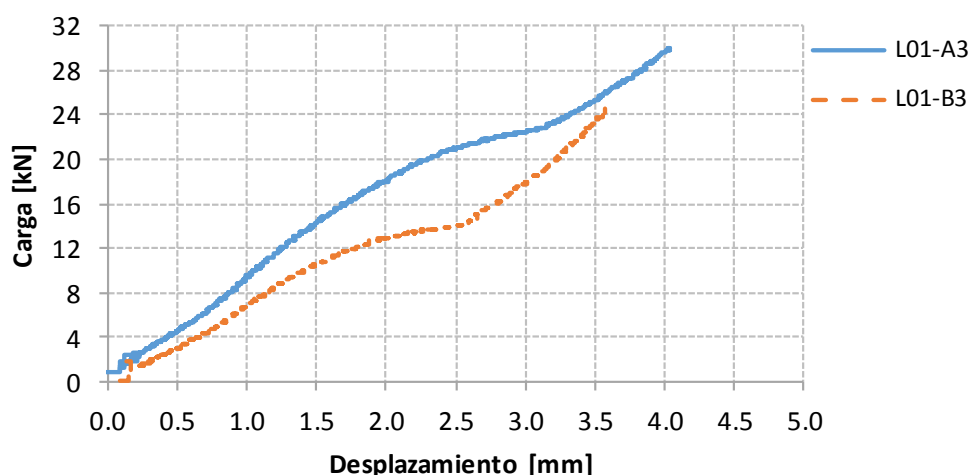


Fig. 4.43. Gráfico Carga-Desplazamiento de los limitadores con tirante (L01-A3) y con paredes verticales (L01-B3) ensayados en puntales.

La Fig. 4.44 muestra el estado final de los distintos diseños del limitador de carga tras los ensayos llevados a cabo. Durante los ensayos experimentales se pudo observar como la plastificación de los distintos elementos del limitador de carga se inició en momentos distintos debido a la excentricidad de la carga. Esta excentricidad provoca que un elemento del limitador de carga se cargue más que otro y, consecuentemente, el efecto del limitador de carga en la respuesta global del puntal se aprecie a niveles de carga ligeramente distintos. Sin embargo, las grandes diferencias encontradas en los limitadores de carga con paredes verticales son debidas a otros factores que provocan, además de un cambio notable en la carga límite para los distintos limitadores, un cambio en la rigidez inicial y en el máximo desplazamiento plástico permitido. En este caso, las diferencias en las condiciones de confinamiento de los limitadores de carga por las paredes verticales de las campanas influyeron de forma drástica en el comportamiento final de los limitadores. Ya se ha demostrado la elevada influencia que puede llegar a tener las condiciones de rozamiento de los limitadores en la campana. Según los resultados obtenidos, se ha podido observar que, al parecer, las paredes verticales de las campanas no funcionan correctamente en la reducción a la mínima expresión de la influencia de este rozamiento.

El resto de limitadores de carga fueron ensayados en condiciones distintas con el objetivo de aislar el efecto de la excentricidad de la carga en los puntales y caracterizar correctamente el comportamiento de los limitadores de carga. De esta forma se pueden obtener conclusiones válidas acerca del comportamiento de los diseños realizados, aislando todas aquellas variables no controladas e intrínsecas al ensayo en condiciones reales.



Fig. 4.44. Estado final de los distintos diseños del limitador de carga tras los ensayos realizados.

La instalación del ensayo puede observarse en la Fig. 4.45. La rosca de un puntal y la campana se utilizaron como soporte de los limitadores de carga con el objetivo de simular de forma real el apoyo de los mismos. La aplicación de la carga se realizó a través de un cilindro con el mismo diámetro que el pasador del puntal (10mm). Además, se utilizaron un captador de desplazamientos y una célula de carga para registrar los resultados del ensayo.

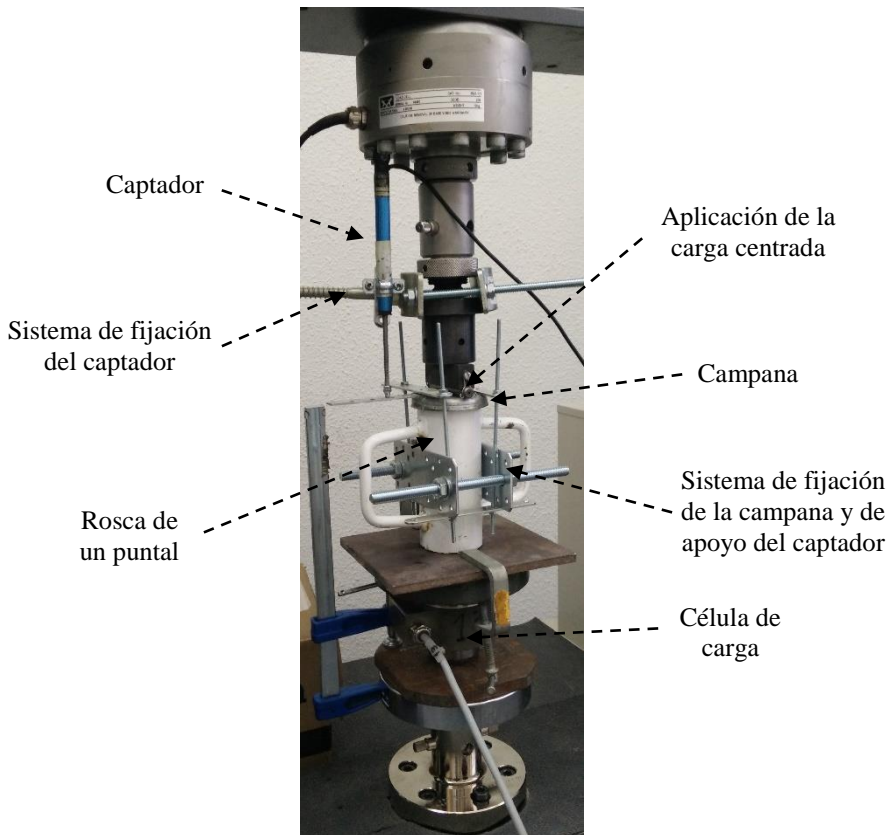


Fig. 4.45. Instalación del ensayo de limitadores de carga de forma aislada.

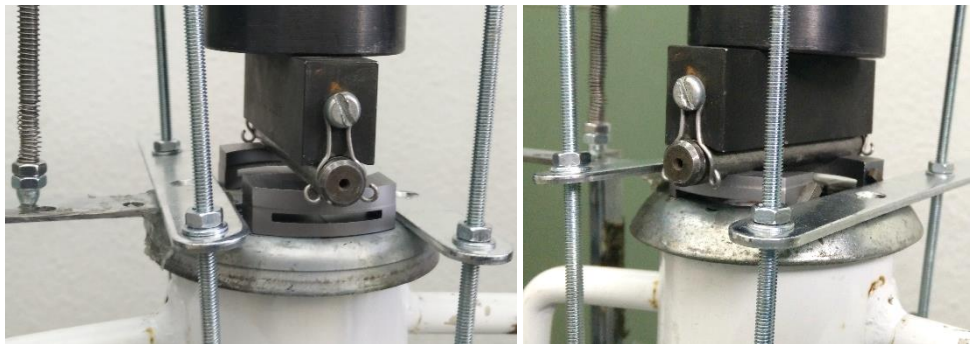


Fig. 4.46. Limitadores de carga de los diseños A y B bajo condiciones de ensayo de forma aislada.

Bajo estas condiciones de ensayo se ensayaron los dos limitadores de carga de cada uno de los diseños (véase Fig. 4.46). Los resultados obtenidos se muestran en la Fig. 4.47 y Fig. 4.48. Se confirman los resultados obtenidos anteriormente, en los que el limitador de carga con tirante (diseño A) tiene mayor carga límite que el limitador con paredes verticales (diseño B), aunque ambos fueron diseñados para la misma carga límite de 14.0kN. También se puede observar que los limitadores de carga con paredes verticales presentan diferencias significativas en cuanto a la carga límite y la máxima deformación plástica obtenida. Tal y como ocurrió en el anterior ensayo, las condiciones de confinamiento proporcionadas para este diseño no resultaron eficaces, mostrando resultados distintos en cada uno de los elementos del limitador de carga y permitiendo que los tabiques puedan abrirse de forma distinta en cada uno de los elementos.

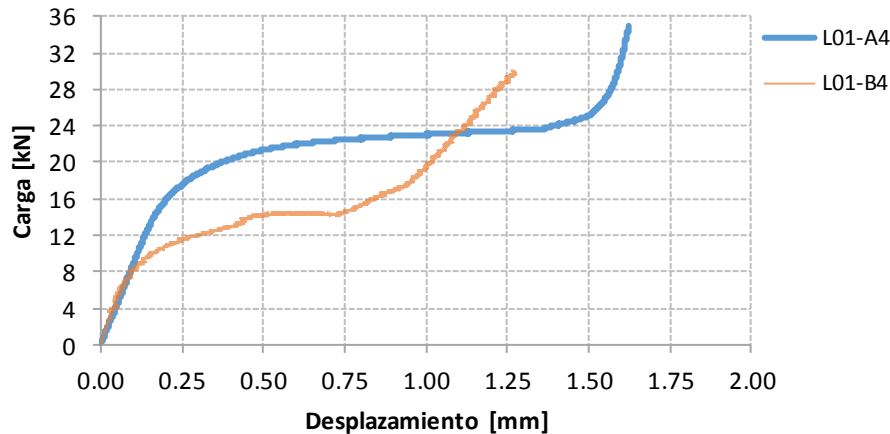


Fig. 4.47. Gráfico Carga-Desplazamiento de los limitadores con tirante (L01-A4) y con paredes verticales (L01-B4) ensayados de forma aislada.

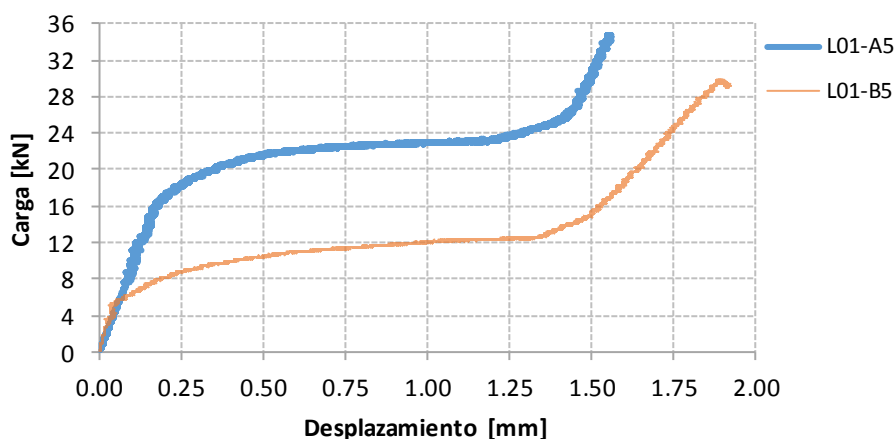


Fig. 4.48. Gráfico Carga-Desplazamiento de los limitadores con tirante (L01-A5) y con paredes verticales (L01-B5) ensayados de forma aislada.

La Fig. 4.49 muestra de forma resumida los resultados obtenidos de estos dos últimos ensayos de cada uno de los diseños. Se puede observar como el diseño A es un diseño robusto, presentando una carga límite y un máximo desplazamiento plástico similar en los distintos ensayos realizados. Sin embargo, el diseño B presenta diferencias significativas en cuanto a carga límite y máximo desplazamiento máximo. Estas grandes diferencias son inadmisibles para el comportamiento de un puntal en el que se debe conocer de forma exhaustiva y repetitiva su comportamiento. Como principal similitud presentan la rigidez inicial, con una rigidez a flexión muy elevada para cumplir con uno de los requisitos de estos limitadores de carga, y la rigidización del sistema una vez se agota el máximo desplazamiento plástico permitido. También cabe destacar el máximo desplazamiento plástico, con valores máximos alrededor a 1.50mm. La máxima altura de diseño (máximo desplazamiento plástico permitido) de estos limitadores de carga es de 2.0mm, tal y como quedó definido durante el proceso de fabricación de los limitadores de carga. Durante el ensayo, la altura efectiva es menor debido a distintas razones:

- Los limitadores de carga presentan una componente bidireccional de flexión que provoca que la parte superior de los limitadores de carga descienda de forma distinta, registrando ligeramente un mayor descenso de la parte interior (aquella en contacto con la caña del puntal) que la parte exterior. Esto provoca que la zona interior de la parte superior del limitador de carga entre en contacto antes que la zona exterior, reduciendo el máximo desplazamiento plástico permitido.
- El diseño A, cuyo funcionamiento es similar a un marco, presenta un ligero levantamiento del tirante en su sección central.
- En el diseño B se produce la apertura de los tabiques, distinta en cada caso.

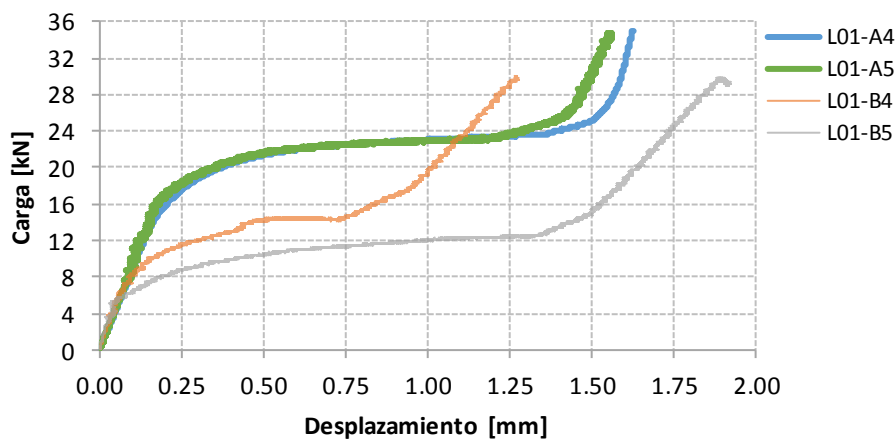


Fig. 4.49. Comparación de curvas Carga-Desplazamiento de los limitadores con tirante (L01-A4 y L01-A5) y con paredes verticales (L01-B4 y L01-B5) ensayados de forma aislada.

Vistos los resultados obtenidos, el comportamiento experimental del diseño A (con tirante) es repetitivo y cumple con los requisitos marcados. Sin embargo, el diseño B (con paredes verticales) no funciona correctamente y presenta una gran dispersión de resultados. Consecuentemente se descartó esta alternativa y el estudio siguió con el diseño A para el que quedaba por determinar por qué la carga límite de diseño de 14.0kN distaba significativamente de la carga límite experimental de 18.0kN.

4.4.1.2. Caracterización del acero

Una de las principales razones por la que la carga límite puede presentar diferencias significativas respecto a la esperada es la calidad del acero empleado. Aunque la matricería encargada de su fabricación tenía el certificado de calidad de su proveedor de acero confirmando que el acero empleado era un acero 275, se realizaron pruebas para confirmar este dato. Los ensayos se realizaron siguiendo la norma UNE-EN ISO 6892-1: “Materiales metálicos. Ensayo de tracción. Parte 1: Métodos de ensayo a temperatura ambiente” [127] en las instalaciones de la Universidad de Alicante, gracias al apoyo mostrado por el profesor Salvador Ivorra. Se monitorizaron las curvas carga-desplazamiento a través de la célula de carga propia de la prensa y un captador de desplazamiento. En la Fig. 4.50 se observan las 3 probetas utilizadas, la configuración del ensayo y la rotura de una de las probetas.

Conociendo el área de cada una de las probetas se pueden determinar las curvas tensión-deformación de comportamiento del material empleado en los limitadores de carga del Lote 01. En la Fig. 4.51 se presentan los resultados para los que se obtuvo un módulo de elasticidad correcto (aproximadamente 210GPa) y un límite elástico de 355MPa. Aunque el proveedor de acero asegura que el acero proporcionado es un acero 275, las pruebas indican lo contrario. Por esta razón, la

carga límite de los limitadores de carga es significativamente superior a la esperada de forma teórica. Como se demostrará en el apartado “4.5.1. Calibración de los modelos numéricos”, esta fue la única razón de las diferencias encontradas entre la carga límite teórica esperada y la carga límite experimental medida.

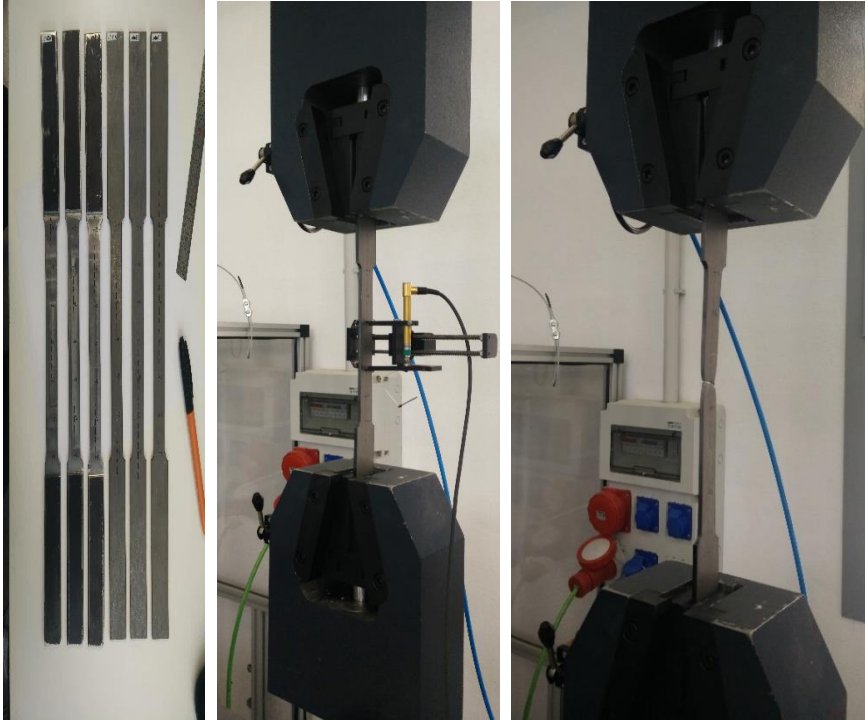


Fig. 4.50. Ensayo de caracterización del acero del Lote 01.

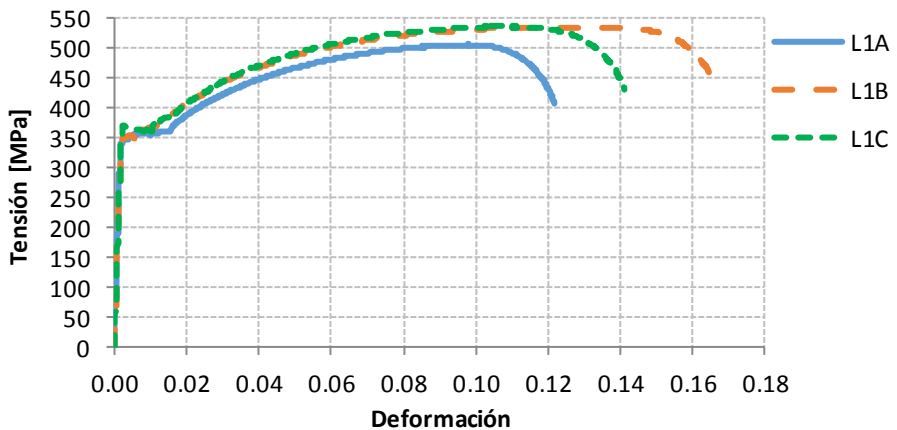


Fig. 4.51. Resultados del ensayo de caracterización del acero para el Lote 01.

4.4.1.3. Estudio de sensibilidad del diámetro del albergue del pasador

Como último punto en cuanto a ensayos sobre limitadores de carga del Lote 01, también se presenta la elevada sensibilidad en los resultados de pequeñas modificaciones en el diámetro del albergue del pasador de los limitadores de carga. Este parámetro se ajustó perfectamente a la geometría del pasador del puntal tomado como referencia. La profundidad de penetración del albergue en los limitadores de carga se estableció en 2mm, mientras que el radio en 5mm. Durante la fabricación del primer limitador de carga hubo un error de fabricación al establecer 7mm como el radio del albergue del pasador. Este limitador de carga, aunque no es válido, se ensayó de forma aislada para estudiar la influencia de este parámetro. En la Fig. 4.52 se muestran los resultados obtenidos en comparación con un limitador de carga previamente ensayado (L01-A4) y con un diámetro correcto (5mm). Con un diámetro superior, la carga límite se reduce drásticamente debido a que la rótula plástica central se desarrolla en una sección de menor dimensión y concentrada en la sección central. En cambio, si el diámetro se ajusta perfectamente, a medida que el limitador se deforma, el albergue del pasador se va cerrando paulatinamente. Esto provoca que el pasador quede apoyado en la parte superior fomentando la creación de una rótula plástica menos concentrada y desarrollada en una sección de mayores dimensiones. De hecho, tras los ensayos realizados hasta el momento para este caso, el pasador dejaba una marca en la parte superior de los limitadores de carga que confirma la creación de una zona de compresión que incrementa la sección donde se aplica la carga, incrementando la capacidad plástica de la sección. De aquí la importancia de las tolerancias tan estrictas de fabricación y el ajuste exacto del diámetro del albergue del pasador al diámetro del pasador del puntal.

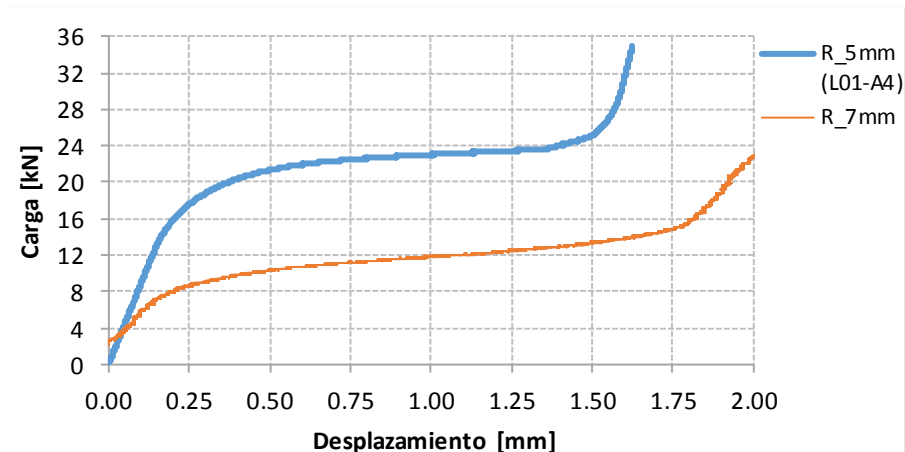


Fig. 4.52. Comparación de resultados entre limitadores de carga con albergues del pasador de radios 5mm y 7mm.

4.4.2. Lote 02. Ensayos sobre el diseño definitivo

El diseño A (con tirante) fue escogido como el diseño definitivo. La repetitividad de los resultados obtenidos y un comportamiento experimental muy cercano al teóricamente definido fueron los dos motivos que respaldaron esta decisión. Una vez escogido este diseño se realizaron otros ensayos adicionales, con limitadores de carga de diferentes cargas límite y sometiénolos tanto a cargas monotónicas (como las pruebas realizadas hasta el momento) como a cargas repetitivas para demostrar y comprobar su posible reutilización en obra. El acero de los limitadores de carga de este lote se mantuvo en un acero de calidad 275, remarcando a la matricería y a la empresa proveedora de acero la importancia crucial que tiene este parámetro en el comportamiento de los limitadores. Se fabricaron en total 16 limitadores de carga con dos niveles distintos de carga límite:

- L02-AN1: 8 limitadores con tirante, 4.0mm de espesor de los tabiques, 3.0mm de espesor del tirante y 5.3mm de espesor del dintel (idéntico al L01-A).
- L02-AN2: 8 limitadores con tirante, 4.0mm de espesor de los tabiques, 3.0mm de espesor del tirante y 6.3mm de espesor del dintel (con una carga límite superior al L01-A).

De cada grupo de 8 limitadores, 4 se ensayaron bajo cargas monotónicas, tanto de forma aislada (2) como instalados en un puntal (otros 2), y otros 4 se ensayaron bajo cargas repetitivas. Los ensayos bajo cargas repetitivas se realizaron con la intención de comprobar y demostrar su posible reutilización siempre y cuando los limitadores no hayan alcanzado un nivel de plastificación que recomiende su sustitución. El plan de ensayo de cada limitador bajo cargas repetitivas fue distinto y se definió a partir de la curva carga-desplazamiento de los limitadores de carga ensayados bajo cargas monotónicas. En unos casos se exige más a los limitadores que en otros, en función del nivel de plastificación de los limitadores de carga a los que se realizan las pruebas. También se considera en algunos casos la acumulación de daño que puede sufrir un limitador de carga. El plan de ensayos se define tomando como referencia la Fig. 4.53 donde se marcan los distintos puntos de la curva carga-desplazamiento a los que somete a los limitadores de carga.

La curva carga-desplazamiento de la Fig. 4.53 viene definida por 6 puntos:

1. Una pequeña carga donde se realizaron las primeras repeticiones. Este nivel de carga sirvió también como una precarga y ajuste de todo el sistema de ensayo para iniciar la totalidad de ensayos bajo las mismas condiciones.
2. Punto definido en rama elástica para comprobar el comportamiento de los limitadores de carga bajo cargas repetitivas justo antes de alcanzar la carga límite.

3. Punto correspondiente a la carga límite. Se define como el punto donde la pendiente (o rigidez de los limitadores) es el promedio entre la pendiente inicial (rama elástica) y la pendiente final (rama plástica).
4. Punto correspondiente al agotamiento de la mitad del desplazamiento plástico máximo permitido.
5. Punto correspondiente al agotamiento del desplazamiento plástico máximo permitido.
6. Punto máximo alcanzado en los ensayos.

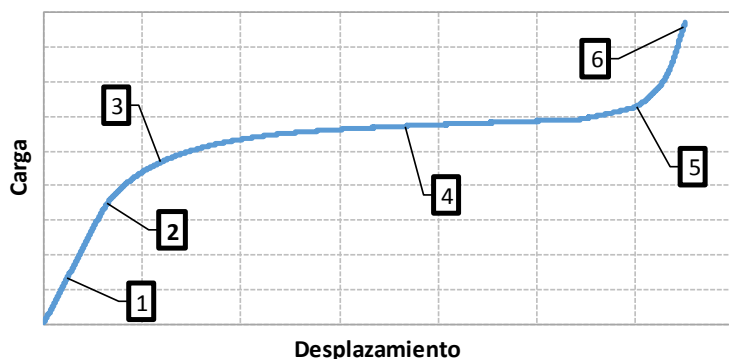


Fig. 4.53. Curva carga-desplazamiento cualitativa para la definición del plan de ensayos.

En la Tabla 4.4 se presentan los ensayos realizados a los 8 limitadores de carga de cada nivel (L02-AN1 y L02-AN2), el plan de ensayo seguido y los códigos utilizados para cada uno de los limitadores donde X toma valores de 1 o 2 en función del nivel de carga límite. En los ensayos bajo carga monotónica se realiza una precarga inicial del sistema con 3 repeticiones, y se incrementa la carga de forma paulatina hasta alcanzar el fin del ensayo (punto 6). En los ensayos bajo cargas repetitivas, además de la precarga inicial, se realizan dos ensayos con 190 repeticiones en un punto concreto de la curva de comportamiento del limitador de carga, y otros dos ensayos considerando la acumulación de daño y realizando cargas repetitivas en distintos puntos de la curva de comportamiento. Cabe destacar el ensayo L02-ANX-6 en el que tras la precarga se realizaron 20 repeticiones en el punto 2, 20 en el punto 3, 30 en el punto 4 y otras 120 sometiendo al limitador de carga a su carga límite habiendo agotado previamente la mitad del desplazamiento plástico máximo permitido.

Dada la cantidad de ensayos realizados y la similitud en los resultados y conclusiones obtenidos, solo se muestran a continuación los resultados correspondientes a los limitadores de carga del primer nivel de carga límite (L02-AN1). Estos resultados se han separado en aquellos correspondientes a los ensayos de limitadores de carga de forma aislada y los correspondientes a limitadores de carga instalados en puntales. Seguidamente se presentan los resultados correspondientes a la caracterización del acero que sirvió para comprobar que la calidad del acero proporcionado se ajustaba a la calidad demandada (Acero 275).

Tabla 4.4 Número de repeticiones realizadas en cada punto en los ensayos realizados a los 8 limitadores de carga de cada nivel (L02-AN1 y L02-AN2).

ID	Tipo de ensayo	Aplicación de cargas	Código	Plan de ensayo [Nº de repeticiones]				
				Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 6
1	Aislado	Monotónica	L02-ANX-1	3	---	---	---	1
2	Aislado	Monotónica	L02-ANX-2	3	---	---	---	1
3	Aislado	Repetitiva	L02-ANX-3	3	---	190	---	1
4	Aislado	Repetitiva	L02-ANX-4	3	---	---	190	1
5	Aislado	Repetitiva	L02-ANX-5	3	20	20	30	1
6	Aislado	Repetitiva	L02-ANX-6	3	20	20 + 120	30	1
7	Puntal	Monotónica	L02-ANX-7	3	---	---	---	1
8	Puntal	Monotónica	L02-ANX-8	3	---	---	---	1

4.4.2.1. Ensayos de limitadores de carga de forma aislada

En este tipo de ensayo se analiza exclusivamente el comportamiento de los limitadores de forma aislada. Por una parte, dicho comportamiento se analizó bajo la aplicación de cargas monotónicas hasta agotar la capacidad máxima de desplazamiento plástico de los limitadores de carga. Por otra, también se analizó el comportamiento de los limitadores de carga bajo la aplicación de cargas repetitivas según el plan de ensayos definido anteriormente. Los resultados de estos ensayos para los limitadores de carga del primer nivel de carga límite (L02-AN1) se muestran a continuación.

En primer lugar, en la Fig. 4.54 se muestran los resultados de los ensayos aplicando carga monotónica. Puede observarse, como se había identificado en los limitadores de este tipo del lote 1 (L01), que existe repetitividad de resultados. Esta vez la carga límite es inferior, alrededor a 14kN, que coincide con la carga límite esperada si se utiliza un acero de calidad 275.

A continuación, en la Fig. 4.55 se observa el resultado del ensayo realizado al limitador L02-AN1-3, aplicando, tras la precarga, 190 ciclos de carga-descarga hasta el valor de la carga límite (punto 3 de la Fig. 4.53). Como se puede observar, en este nivel de carga ya se ha producido un ligero desplazamiento plástico de los limitadores de carga. También ha quedado ampliamente demostrado, con estas 190 repeticiones, la posible reutilización de los limitadores de carga, aunque estos hayan sufrido, en su historial de carga, cargas que hayan alcanzado el valor de la carga

límite. Su comportamiento tras los 190 ciclos de carga-descarga es prácticamente idéntico al inicial, e incluso más similar al teóricamente definido. Presenta una rama elástica inicial hasta alcanzar la carga límite, punto en el que su comportamiento se convierte en un comportamiento eminentemente plástico, manteniendo y aumentando ligeramente la carga, hasta agotar el máximo desplazamiento plástico permitido.

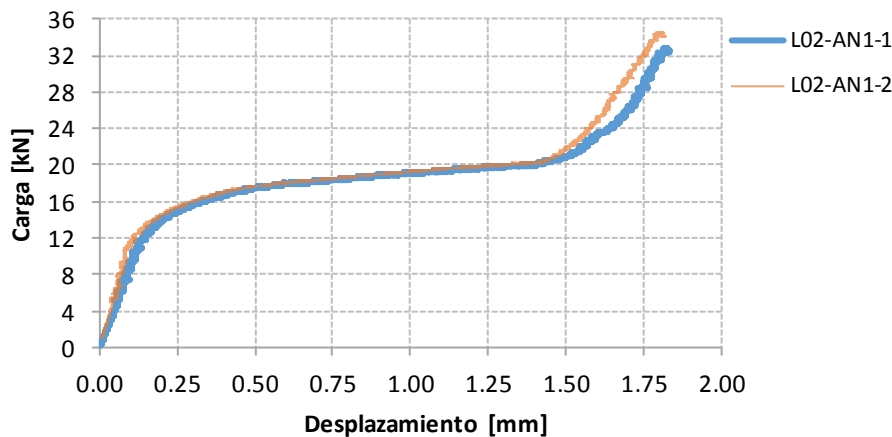


Fig. 4.54. Ensayos bajo la aplicación de carga monotónica realizados a limitadores de carga ensayados de forma aislada.

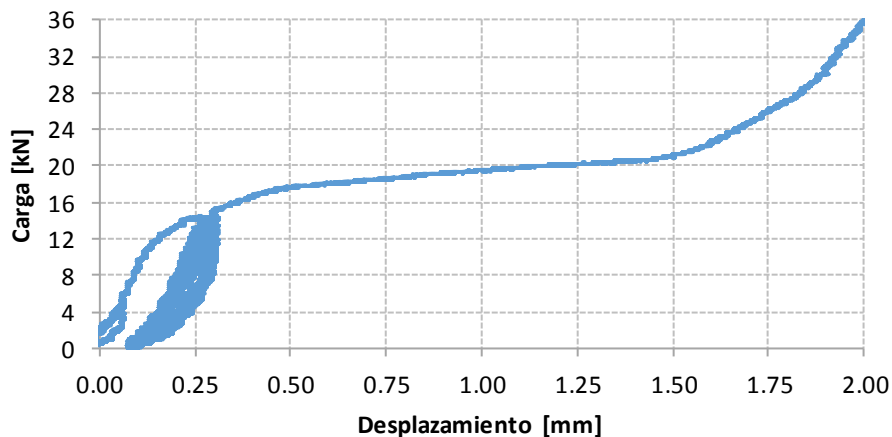


Fig. 4.55. Ensayo bajo la aplicación de cargas repetitivas según el plan de ensayo definido para L02-AN1-3.

En la Fig. 4.56 se observa el resultado del ensayo realizado al limitador L02-AN1-4, aplicando, tras la precarga, 190 ciclos de carga-descarga hasta agotar la mitad del desplazamiento plástico máximo permitido (punto 4 de la Fig. 4.53).

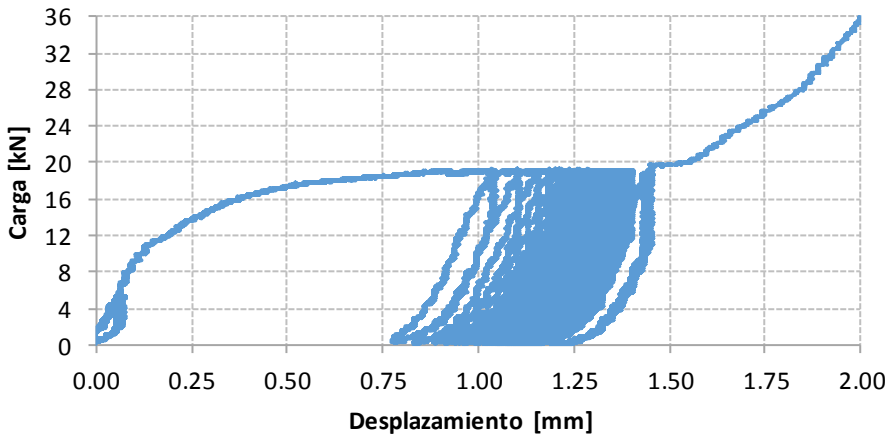


Fig. 4.56. Ensayo bajo la aplicación de cargas repetitivas según el plan de ensayo definido para L02-AN1-4.

También ha quedado demostrado, con estas 190 repeticiones, la posible reutilización de los limitadores de carga aunque estos hayan sufrido, en su historial de carga, cargas que hayan agotado la mitad del desplazamiento plástico máximo permitido. Su comportamiento tras los 190 ciclos de carga-descarga es prácticamente idéntico al inicial, e incluso más similar al teóricamente definido. Presenta una rama elástica inicial hasta alcanzar, en este caso, una carga ligeramente superior a la carga límite, punto en el que su comportamiento se convierte en un comportamiento eminentemente plástico, manteniendo este valor de carga, hasta agotar el máximo desplazamiento plástico permitido. Sin embargo, la acumulación de daño en este punto es evidente. Se produce un pequeño agotamiento adicional del máximo desplazamiento plástico permitido cada vez que se alcanza de nuevo el valor actualizado de la carga límite (punto 4). Adicionalmente, es evidente que es menor el margen del limitador de carga hasta alcanzar el máximo desplazamiento plástico permitido. En estos casos, también la seguridad que presenta el limitador de carga es menor. Consecuentemente, y ya que es muy sencilla la detección visual de un limitador de carga que haya agotado la mitad de su máximo desplazamiento plástico permitido (véase Fig. 4.57), podría ser recomendable su sustitución por uno nuevo.

En la Fig. 4.58 se observa el resultado del ensayo realizado al limitador L02-AN1-5, aplicando, tras la precarga, 20 ciclos de carga-descarga en rama elástica (punto 2 de la Fig. 4.53), 20 ciclos hasta la carga límite (punto 3 de la Fig. 4.53) y 30 ciclos hasta el agotamiento de la mitad del máximo desplazamiento plástico permitido (punto 4 de la Fig. 4.53). También ha quedado demostrado, con este plan de ensayo en el que la acumulación de daño se realiza a distintos niveles, la posible reutilización de los limitadores de carga aunque estos hayan sufrido, en su historial de carga, cargas que hayan agotado incluso la mitad del desplazamiento plástico máximo permitido. Su comportamiento tras los ciclos de carga-descarga es prácticamente

idéntico al inicial, e incluso más similar al teóricamente definido. Presenta una rama elástica inicial y un comportamiento eminentemente plástico hasta agotar el máximo desplazamiento plástico permitido. Pueden obtenerse conclusiones similares a las obtenidas para L02-AN1-4 cuando se alcanza el agotamiento de la mitad del máximo desplazamiento plástico permitido.

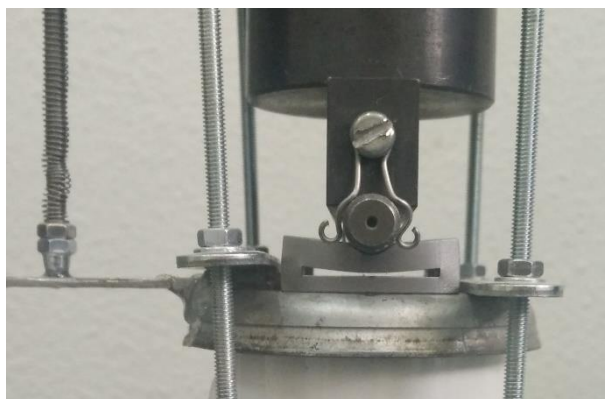


Fig. 4.57. Estado del limitador de carga tras el agotamiento de la mitad del máximo desplazamiento plástico permitido.

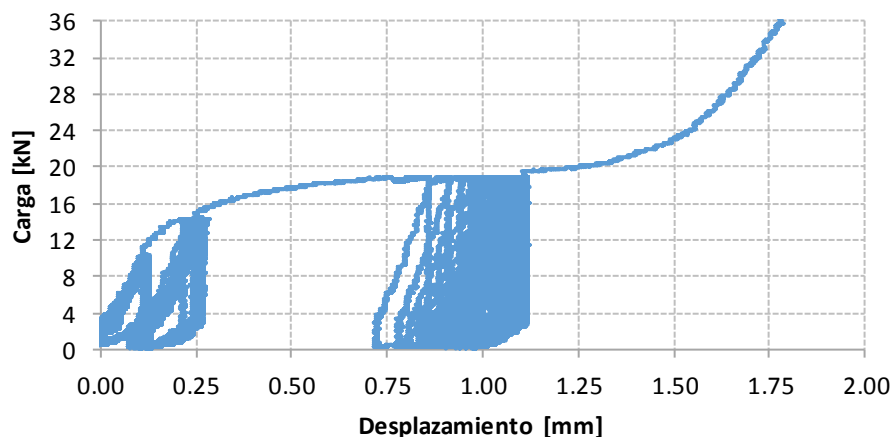


Fig. 4.58. Ensayo bajo la aplicación de cargas repetitivas según el plan de ensayo definido para L02-AN1-5.

Finalmente, el resultado del ensayo más exigente realizado (L02-AN1-6) se muestra en la Fig. 4.59. Tras la precarga se aplicaron 20 ciclos de carga-descarga en rama elástica (punto 2 de la Fig. 4.53), 20 ciclos hasta la carga límite (punto 3 de la Fig. 4.53), 30 ciclos hasta el agotamiento de la mitad del máximo desplazamiento plástico permitido (punto 4 de la Fig. 4.53) y otros 120 ciclos hasta la carga límite (punto 3 de la Fig. 4.53). También ha quedado demostrado, con este plan de ensayo tan exigente, la posible reutilización de los limitadores de carga aunque estos hayan

sufrido cargas que hayan agotado incluso la mitad del desplazamiento plástico máximo permitido. Si estos limitadores, que han sufrido este agresivo agotamiento del máximo desplazamiento plástico permitido, no vuelven a superar su carga límite, su comportamiento es casi idéntico al inicial, quedando todavía una reserva de seguridad para prevenir posibles cargas mayores a la carga límite. Sin embargo, tal y como se ha comentado anteriormente, la identificación visual del agotamiento de la mitad del máximo desplazamiento plástico permitido recomendaría su sustitución por uno nuevo.

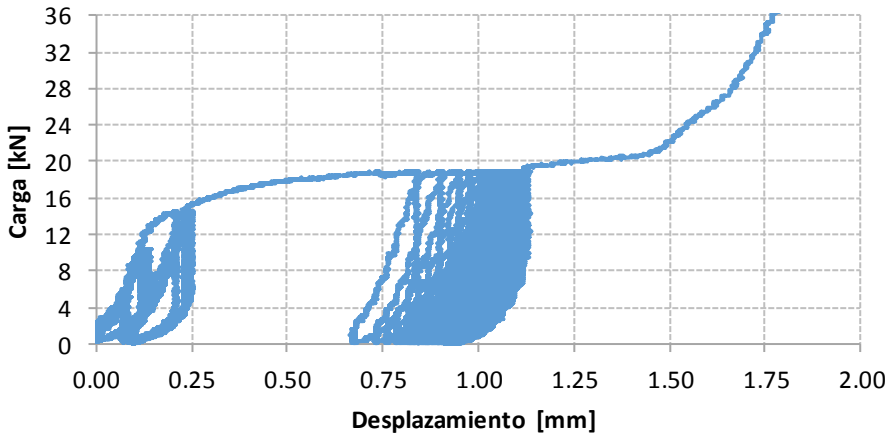


Fig. 4.59. Ensayo bajo la aplicación de cargas repetitivas según el plan de ensayo definido para L02-AN1-6.

4.4.2.2. Ensayos de limitadores de carga instalados en puntales

En este tipo de ensayo se analiza el comportamiento de los limitadores de carga instalados en puntales, con el fin de estimar el comportamiento del conjunto puntal-limitador para los limitadores fabricados dentro del Lote 02. Como se ha descrito en el plan de ensayos de la Tabla 4.4, este ensayo se realizó en dos limitadores de carga de cada uno de los niveles de carga límite definidos. Se presenta, en la Fig. 4.60, los resultados del ensayo del limitador L02-AN1-7 y del limitador L02-AN1-8 correspondientes al primer nivel de carga límite definido.

A la vista de los resultados queda demostrada la repetitividad del comportamiento de diferentes limitadores de carga instalados en puntales, así como la reducción drástica de la rigidez del puntal una vez se supera su carga límite. También ha quedado demostrado, viendo los niveles de deformación de los limitadores ensayados de forma aislada y los limitadores ensayados en puntales, que la afección de los limitadores de carga a la rigidez de la rama elástica de un puntal es muy pequeña, presentando un comportamiento casi idéntico.

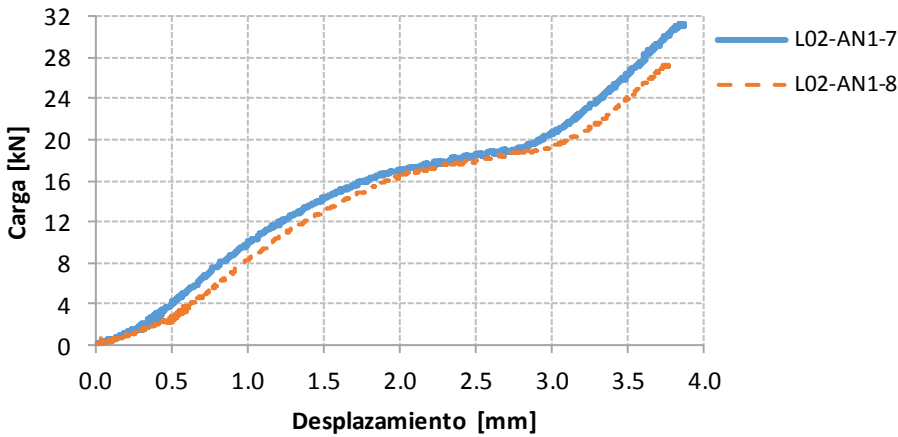


Fig. 4.60. Ensayo de limitadores de carga del lote 02 instalados en puntales.

4.4.2.3. Caracterización del acero

Para la caracterización del acero empleado en los limitadores de carga del Lote 02 se empleó la misma metodología seguida para el Lote 01. En la Fig. 4.61 se presentan los resultados para los que se obtuvo un módulo de elasticidad correcto (aproximadamente 210GPa) y un límite elástico de 275MPa, tal y como se había demandado al proveedor de acero. Se presentan los resultados de solo dos probetas porque la tercera fue descartada por su incorrecto modo de rotura. Esta vez, tal y como se ha visto anteriormente, la carga límite obtenida experimentalmente sí fue la esperada, confirmándose en este punto que el acero empleado para la fabricación de los limitadores de carga había sido el previsto.

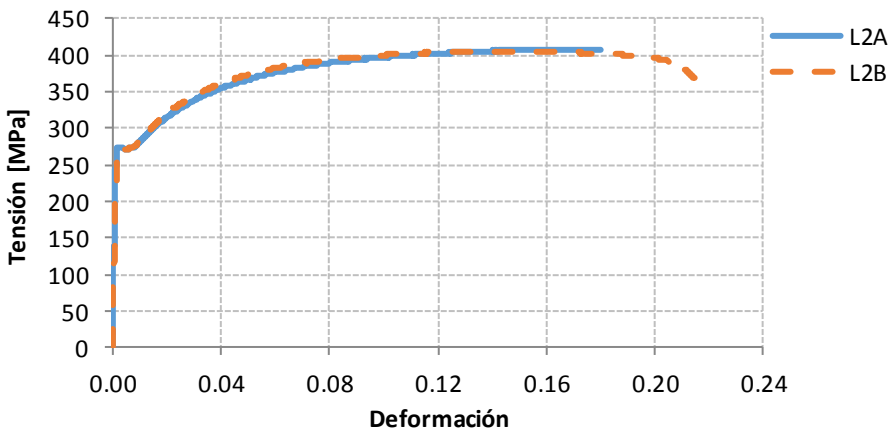


Fig. 4.61. Resultados del ensayo de caracterización del acero para el Lote 02.

4.5. Simulación

Tras los ensayos experimentales realizados, en este apartado se trata la calibración de los modelos numéricos que serán de gran utilidad para conocer y prever de forma exacta el comportamiento de los limitadores de carga. También se tratan aspectos más prácticos sobre como considerar el comportamiento de estos limitadores de carga en simulaciones numéricas a gran escala, como por ejemplo en la simulación de estructuras de edificios completos durante su construcción.

4.5.1. Calibración de los modelos numéricos

En el apartado “4.2.2. Diseño de detalle” se ha realizado una extensa descripción de los modelos numéricos llevados a cabo. Para conseguir la calibración de un modelo numérico en base a los resultados experimentales obtenidos, el primero paso que debe realizarse consiste en detectar qué aspectos del modelo formado por pasador, limitador y campana, difieren de la realidad. El único aspecto distinto que se consideró en la fase de diseño de los limitadores de carga fue el comportamiento plástico del acero de los limitadores de carga. En fase de diseño se consideró un modelo elástico-perfectamente plástico del acero como el representado en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, mientras que la realidad es ligeramente distinta (véase Fig. 4.61). El acero utilizado presenta una rama elástica idéntica a la considerada en fase de diseño, pero tiene una rama plástica con endurecimiento que aumenta de forma considerable la resistencia del material en fase plástica. La definición exacta de este comportamiento resulta crucial para considerar de forma correcta la formación de rótulas plásticas y, en definitiva, el comportamiento del limitador de carga en fase plástica. Por lo tanto, tras la introducción de la curva de comportamiento real del acero en los modelos numéricos llevados a cabo, la Fig. 4.62 muestra los resultados obtenidos de la simulación de los limitadores de carga L02-AN1 en comparación con los resultados experimentales obtenidos para uno de los limitadores de carga ensayados (L01-AN1-1).

Los resultados obtenidos son idénticos a los experimentales. Consecuentemente se validan los modelos numéricos llevados a cabo. Estos modelos servirán para prever el comportamiento real de futuros limitadores de carga, bien sea para la definición de los limitadores de carga en la construcción del edificio experimental del Capítulo 5, o bien en la definición de limitadores de carga para otros trabajos.

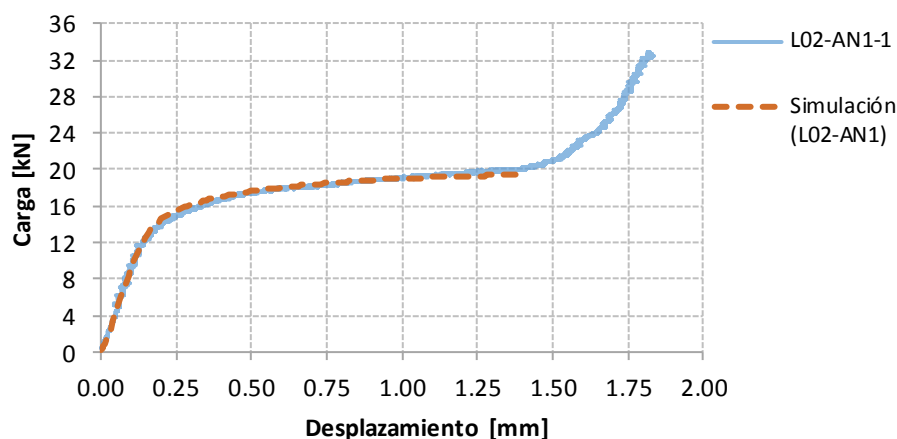


Fig. 4.62. Calibración del modelo numérico.

4.5.2. Definición simplificada del comportamiento de los limitadores de carga para modelos macro-escala

La metodología definida para la simulación de limitadores de carga presenta un elevado coste computacional que únicamente tiene sentido en análisis micro-escala (comportamiento de un solo puntal) como aquellos realizados en este capítulo. Para modelos macro-escala, en los que por ejemplo se simula la construcción de estructuras de edificios completos, es necesaria la aplicación de modelos de comportamiento más simplificados del conjunto puntal-limitador de carga. En esta línea, ya en el año 2015 [45] se propusieron modelos de comportamiento más simplificados como el detallado en el Capítulo 3 de esta tesis doctoral. Estos modelos más simplificados se definieron desde un marco teórico, sin conocer cómo iba a ser el diseño del limitador de carga ni su comportamiento real o experimental definitivo. Una vez conocido y caracterizado dicho comportamiento, en este sub-apartado se propone un modelo de comportamiento simplificado del conjunto puntal más limitador de carga para su aplicación en modelos macro-escala. De esta forma tampoco será necesario realizar ensayos de caracterización de dicho comportamiento cada vez que se desee considerar un nuevo limitador de carga en los modelos.

Tras un extenso análisis de todos los resultados obtenidos, en la Fig. 4.63 se propone un modelo de comportamiento del limitador de carga instalado en un puntal que se ajusta al comportamiento experimental registrado en los ensayos. Este comportamiento genérico para cualquier puntal y limitador de carga viene principalmente definido por 4 tramos. Los 5 puntos que definen dichos tramos son:

- Punto 2: Correspondiente a la carga límite del limitador de carga (q_y) con una rigidez de valor EA/L (pendiente del primer tramo) igual a la rigidez del

puntal aislado con una pequeña reducción del módulo de elasticidad de 210GPa a 190GPa por la introducción del efecto de los limitadores de carga.

- Punto 4: Define el tramo 3 que une el punto 2 y llega al punto 4 con una pendiente igual al 15% de la pendiente inicial ($0.150 \cdot EA/L$). El punto 4 viene determinado por el máximo desplazamiento plástico efectivo en el limitador de carga. El máximo desplazamiento plástico efectivo es el resultado de reducir el máximo desplazamiento plástico permitido en medio milímetro.
- Punto 1: Situado en el tramo 1 con una carga igual a la carga límite del limitador de carga reducida por el factor 1.1 ($q_y/1.1$).
- Punto 3: La pendiente del tramo 2 es el promedio entre la pendiente del tramo 1 y la pendiente del tramo 3, es decir, una pendiente igual al 57.5% de la pendiente inicial ($0.575 \cdot EA/L$). El punto 3 es el resultado de la intersección entre el tramo 2 y el tramo 3 tras aplicar estas condiciones.
- Punto 5: Se corresponde con la carga de rotura del puntal (q_u). El punto 5 es el resultado de aplicar esta condición e igualar la pendiente del 4º tramo a la pendiente inicial.

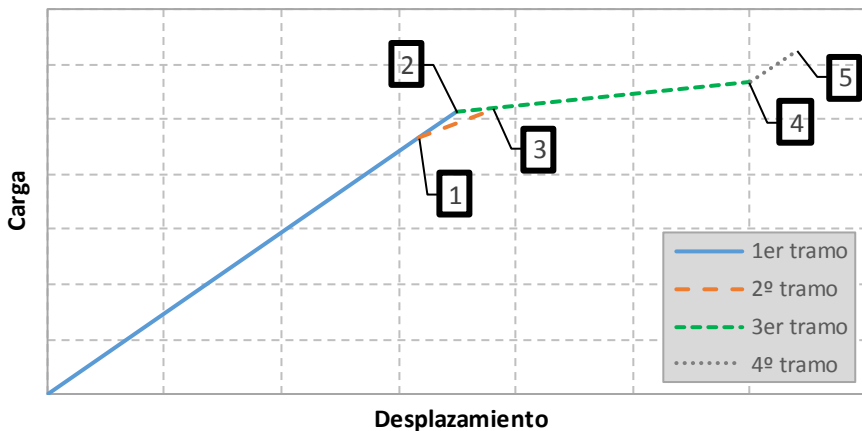


Fig. 4.63. Comportamiento puntal más limitador de carga para modelos numéricos macro-escala.

Uno de los estudios numéricos realizados en el Capítulo 6 utiliza esta aproximación simplificada al comportamiento del puntal más el limitador de carga en modelos macro-escala. Supone, por tanto, una metodología simplificada que se puede utilizar en el futuro y que queda respaldada por multitud de ensayos experimentales, algunos recopilados en este documento de tesis doctoral.

4.6. Conclusiones

En este Capítulo se ha recopilado el trabajo realizado para llegar al diseño definitivo de los limitadores de carga. Tras las primeras ideas conceptuales, el diseño de detalle

quedó definido con ayuda de la simulación numérica y la técnica del diseño de experimentos. Una vez alcanzados los distintos diseños definitivos se fabricaron y ensayaron distintos lotes de limitadores de carga, obteniendo las siguientes conclusiones:

- El limitador de carga correspondiente al diseño B con paredes verticales quedó descartado tras el primer lote de ensayos. Los resultados mostraron una elevada variabilidad, no cumpliéndose por tanto el requisito de repetitividad que se le exige a los limitadores de carga. La apertura de los tabiques, bajo las condiciones variables de confinamiento proporcionadas por las paredes verticales de la campana, es la principal razón de la diversidad de resultados obtenidos.
- Los limitadores de carga correspondientes al diseño A con tirante cumplen los requisitos marcados:
 - La rigidez inicial del tramo elástico es muy elevada. Consecuentemente, no se modifica la rigidez de un puntal en su rama elástica.
 - Presentan comportamiento plástico al alcanzar la carga límite prevista. El cambio del comportamiento elástico al plástico es suave, no introduciendo discontinuidades en el comportamiento de los puntales que provocarían un funcionamiento deficiente. La calidad del acero empleado es un parámetro fundamental que debe conocerse con exactitud para todos los limitadores de carga. De lo contrario, la carga límite esperada será totalmente distinta a la carga límite real.
 - Son capaces de mantener la carga al valor de la carga límite o en valores ligeramente superiores mientras se agota el máximo desplazamiento plástico permitido.
 - Presentan un máximo desplazamiento plástico que limita el descenso máximo adicional permitido del elemento constructivo que sustentan los puntales (por ejemplo, los forjados).
 - Tras agotar el máximo desplazamiento plástico permitido son capaces de seguir aprovechando la resistencia residual del puntal hasta su punto de rotura. En ningún momento se desaprovecha esta resistencia adicional. Tan solo se limita la carga de los puntales a su carga admisible.
 - La reutilización de los limitadores de carga ha quedado demostrada con los ensayos bajo cargas repetitivas, alcanzando, durante los ensayos, repeticiones de la carga de hasta 190 veces. Bajo ciertas condiciones no se ha observado acumulación de daño, pudiendo extender su uso a muchas más repeticiones. Sin embargo, se recomienda la sustitución de los limitadores de carga si, bajo inspección visual, han superado la mitad del máximo

desplazamiento plástico permitido. En estos casos, la reserva de desplazamiento plástico disponible es claramente inferior y la acumulación de daño resulta evidente. Si se ha realizado un diseño correcto, no se considera habitual alcanzar este nivel de daño. Por lo tanto, la sustitución de limitadores de carga solo se producirá en situaciones muy concretas en las que probablemente se hayan evitado fallos en la seguridad durante la construcción.

- Previsiblemente, los limitadores fabricados en acero convencional tendrán un coste reducido, dentro de los límites establecidos. Su aplicación práctica depende en gran medida de este parámetro, considerándolo en todo momento en la fase de diseño.

Tras los ensayos experimentales, los modelos numéricos llevados a cabo quedaron calibrados obteniendo resultados idénticos. Estos modelos pueden ser utilizados, por tanto, para prever con exactitud el comportamiento de los limitadores de carga bajo diferentes situaciones.

Por último, se ha propuesto una metodología simplificada y genérica para establecer el comportamiento de puntales más limitadores de carga. Esta metodología puede ser utilizada, por ejemplo, en simulaciones numéricas macro-escala.

CAPÍTULO 5. USO DE LOS LIMITADORES DE CARGA DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DE UN EDIFICIO EXPERIMENTAL

5.1. Introducción

Como paso previo a la introducción de los limitadores de carga en el mercado se muestra en este capítulo el comportamiento de los limitadores de carga (patente número ES2636833) bajo condiciones reales. En este capítulo se describe un ensayo experimental, a modo prueba de concepto, para demostrar su aplicabilidad y posible reutilización en la construcción de una estructura de edificio. Para la realización del ensayo experimental se contó con la colaboración de una empresa constructora (Levantina, Ingeniería y Construcción, S.L.) y una empresa de cimbras (Encofrados J. Alsina S.A.) cuya aportación posibilitó la realización de este ensayo experimental.

El capítulo se ha organizado como se describe a continuación. En primer lugar se presenta la definición del ensayo experimental estableciendo los objetivos, el dimensionamiento, la simulación numérica utilizada para su definición, la fabricación y comprobación de los limitadores de carga que fueron utilizados en el ensayo experimental y la monitorización definida para el ensayo. Seguidamente se presenta una extensa descripción de la preparación del ensayo y su realización. Posteriormente se presentan los resultados obtenidos. Finalmente se presenta una serie de conclusiones obtenidas de los trabajos realizados en este capítulo.

5.2. Definición del ensayo experimental

5.2.1. Objetivos

El principal objetivo del desarrollo de un ensayo experimental consiste en la validación del uso de limitadores de carga en puntales que permita comprobar su uso en condiciones reales y analizar las diferentes ventajas que comporta. Tal y como se ha analizado en el Capítulo 3, los puntales más cargados aparecen habitualmente en el centro de vano y es aquí donde se inicia el comportamiento plástico de los limitadores de carga, en el caso en el que la carga de los puntales intente superar la carga límite. Esto ocurre porque la flecha del forjado es siempre mayor en el centro de vano que en la zona de pilares, donde los puntales más cercanos a esta última zona presentan cargas muy pequeñas. Consecuentemente, el objetivo del ensayo experimental es reproducir unas condiciones similares a la deformabilidad bidireccional de un forjado con flechas máximas en el centro de vano para analizar

cómo se comportan el sistema de apuntalamiento con limitadores de carga instalados.

5.2.2. Diseño del ensayo

5.2.2.1. Aspectos generales. Diseño geométrico

Cumpliendo con los objetivos marcados, simplificando la realización de un ensayo a escala real, y considerando las condiciones del laboratorio del ICITECH de la UPV, se consideró la ejecución de un pequeño edificio de una sola planta y un solo vano ($5 \times 5 \text{m}^2$). El edificio se ejecutó con un forjado de losa maciza de flexión bidireccional, con flechas máximas en el centro de vano, y simplemente apoyado en cuatro pilares para facilitar su demolición.

Se consideraron 4 pilares metálicos con perfiles HEB-140 conectados a unas zapatas ($1.25 \times 1.25 \times 0.30 \text{m}^3$) aisladas que proporcionaban el soporte y mantenían la verticalidad de dichos pilares. Las zapatas, a su vez, se dejaron simplemente apoyadas en la losa de los laboratorios del ICITECH. Se colocaron 4 cruces de San Andrés conectando los 4 pilares para asegurar la verticalidad de los mismos, la estabilidad horizontal y la separación de 5m entre cada uno de los pilares.

La altura libre del forjado fue de 2.40m que permite trabajar de forma cómoda en las operaciones a realizar en la cimbra. Esta altura también permite que los puntales que van ubicados sobre las zapatas, cerca de los pilares, tengan una altura superior a la altura mínima de funcionamiento de los puntales utilizados (puntales de 3m de la empresa Encofrados J. Alsina S.A. con una altura mínima de funcionamiento de 1.80 m).

El cimbrado, armado, hormigonado y subsecuentes operaciones a realizar en la ejecución de la losa se realizaron in situ, con mediciones en tiempo real, con el objetivo de analizar las cargas en puntales durante la construcción del edificio. La superficie total de la losa fue $5.25 \times 5.25 \text{m}^2$.

En el apartado “5.3. Preparación y descripción del ensayo” y en el apéndice 1, apartado “A1.2. Planos” se pueden observar más detalles de la geometría y construcción de la losa.

5.2.2.2. Materiales

Tanto el forjado como la zapata están formados por hormigón armado de las siguientes características:

- Hormigón HA-25/B/20/IIa.
- Acero B 500 S.

5.2.2.3. Acciones y coeficientes de seguridad en fase de construcción y en servicio

En fase de construcción se han considerado las acciones sin mayorar con tal de conocer con exactitud las cargas a las que van a estar sometidos los puntales durante el ensayo. Como acciones se han considerado el peso propio de la estructura, además de una carga adicional sobre la losa que simulará la carga del hormigonado de un supuesto nivel 2 de edificio y las sobrecargas de construcción del nivel 1 y del supuesto nivel 2. En el apartado “5.3. Preparación y descripción del ensayo” se profundiza en las etapas del proceso constructivo.

Para el dimensionamiento de los distintos elementos se han considerado las acciones en la hipotética fase de servicio de la estructura (CTE-SE-AE) mayoradas según los ELU definidos en la EHE-08. A continuación se detallan las cargas consideradas:

- Acciones permanentes (Coeficiente de mayoración de 1.35):
 - Peso propio de la estructura.
 - Carga permanente adicional (tabiques y solado): 2.0kN/m^2 .
- Acciones variables (Coeficiente de mayoración de 1.50):
 - Sobrecarga de uso correspondiente a edificación residencial: 2.0kN/m^2 .

5.2.2.4. Cálculos estructurales en servicio para el dimensionamiento de la losa

Para el dimensionamiento de los distintos elementos de hormigón se han seguido las directrices marcadas por la EHE-08. En el apéndice 1, apartado “A1.2. Planos”, aparece una definición exhaustiva de la geometría y armado de los distintos elementos. El espesor de la losa, que tanto influye en la rigidez y deformabilidad de la misma, fue objeto de análisis mediante simulación numérica para definir qué espesor utilizar en el ensayo que permitiera provocar la plastificación de determinados limitadores de carga.

5.2.2.5. Seguridad y salud

Se tomaron las medidas de seguridad necesarias durante la construcción del edificio. Entre otras medidas:

- Casco y botas de seguridad.
- Valla anticaídas en la losa.
- Sistema anticaídas individual.
- Valla perimetral en la zona del ensayo experimental.

5.2.3. Modelo de elementos finitos

El diseño y definición del ensayo requirió de un análisis mediante simulación numérica para establecer qué espesor de la losa y qué limitadores de carga debían emplearse con el objetivo de poder comprobar el correcto funcionamiento de los limitadores de carga bajo condiciones reales.

El proceso constructivo escogido para la realización del ensayo experimental consistió en un proceso CCD (Cimbrado/Clareado/Descimbrado) con 2 plantas consecutivas cimbradas y con hormigonados cada 7 días, clareados a los 3 días del hormigonado y descimbrados 1 día antes del hormigonado de la siguiente planta. Este proceso constructivo permitiría obtener cargas elevadas en los puntales de la planta baja donde se instalaron limitadores de carga. La modelización llevado a cabo del proceso constructivo del ensayo experimental se realizó en base a las hipótesis adoptadas en el Capítulo 3, y según la siguiente secuencia:

1. Hormigonado de la losa evitando acumulación de hormigón en puntos concretos. En la Fig. 5.1, salvo las zapatas de los pilares, aparece representado el estado de la estructura tras el hormigonado.

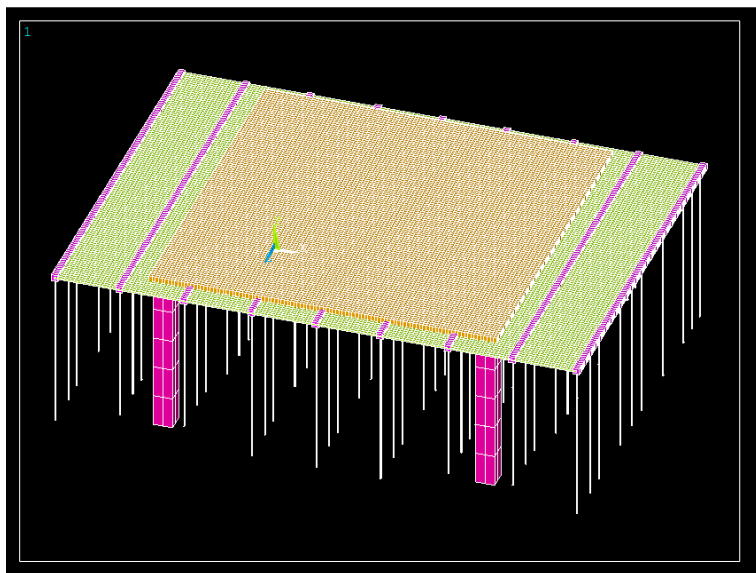


Fig. 5.1. Hormigonado de la losa.

2. Día 3: Clareado del forjado. Retirada de las portasopandas, de las sopandas secundarias y de todos los fondos de encofrado. Solo quedan instalados las sopandas principales y los puntales de dichas sopandas. En la Fig. 5.2, salvo las zapatas de los pilares, aparece representado el estado de la estructura tras realizar el clareado.

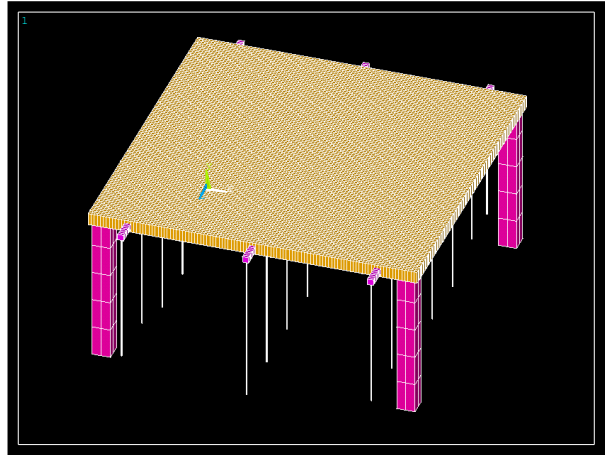


Fig. 5.2. Clareado de la losa.

3. Día 7: Carga sobre el forjado de 7kN/m^2 . En la Fig. 5.3, salvo las zapatas de los pilares, aparece representado el estado de la estructura tras la aplicación de la carga (color rojo) sobre la losa. Este es el último paso imprescindible para la simulación numérica, ya que es en este momento cuando se registrarán las cargas máximas en puntales, deberían entrar en funcionamiento los limitadores de carga y es suficiente para definir el ensayo experimental.

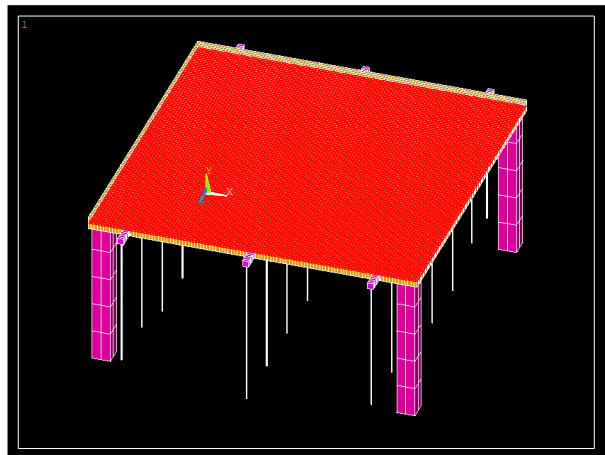


Fig. 5.3. Carga en la losa.

En este modelo de elementos finitos se realizó un análisis paramétrico para poder analizar qué configuración del ensayo resultaba adecuada. Los parámetros estudiados fueron:

- Canto de la losa: 16cm, 18cm, 20cm y 25cm.

- Limitadores de carga: comportamiento macro-escala medido experimentalmente (puntal más limitador de carga) en el Capítulo 4 para: a) un limitador de carga de 14.0kN (L02-AN1); b) otro limitador de carga de 18.0kN (L01-A); y c) sin limitadores.

Tras la obtención de resultados de los 12 modelos calculados, el canto de la losa mínimo para evitar la fisuración durante la construcción fue de 20cm para cualquier limitador de carga considerado. Para este canto de forjado se registraron diferentes cargas máximas teóricas en puntales:

- Caso sin limitadores de carga: 23.0kN.
- Caso con limitadores de carga de 18.0kN: 19.4kN (reducida plastificación).
- Caso con limitadores de carga de 14.0kN: 17.9kN (elevada plastificación).

Generalmente, los limitadores de carga de 18.0kN producían una plastificación de los limitadores de carga muy reducida, que hubiera sido casi inapreciable durante el ensayo experimental en el caso de haber escogido limitadores de carga de 18.0kN. Los limitadores de carga de 14.0kN, en cambio, presentaban una plastificación elevada.

Finalmente se escogió el mínimo canto de la losa que no producía fisuración en el forjado (20cm), y limitadores de carga de 16.0kN con una carga límite intermedia a las soluciones calculadas.

5.2.4. Fabricación y ensayo previo de limitadores de carga

La fabricación y ensayo previo de los limitadores de carga se realizó antes de iniciar la construcción del ensayo experimental. En primer lugar, antes de estudiar qué geometría debía presentar los limitadores de carga para que su carga límite fuera de 16.0kN, se realizó un pedido de acero de la cantidad total necesaria para los limitadores de carga y tres probetas tipo hueso para comprobar la calidad del acero recibido. El precio del acero 275 y el acero 355 es muy similar y puede ser una causa de problemas en el comportamiento esperado de los limitadores de carga. Aunque se pidió la recepción de acero 275, tras las pruebas realizadas a las probetas tipo hueso, se pudo comprobar que el acero presentaba un límite elástico de 355MPa. Los ensayos sobre estas probetas siguieron la misma metodología explicada en el Capítulo 4. La Fig. 5.4 muestra los resultados obtenidos.

Con ayuda de los modelos numéricos llevados a cabo a pequeña escala y detallados en el Capítulo 4 de esta tesis doctoral se diseñaron nuevos limitadores de carga con una carga límite de 16.0kN y un acero con límite elástico de 355MPa. Las características geométricas de los nuevos limitadores de carga son:

- Limitadores de carga con tirante y con una carga límite teórica de 16.0kN, 4.0mm de espesor de los tabiques, 2.0mm de altura de hueco, 3.0mm de espesor del tirante y 4.8mm de espesor del dintel.

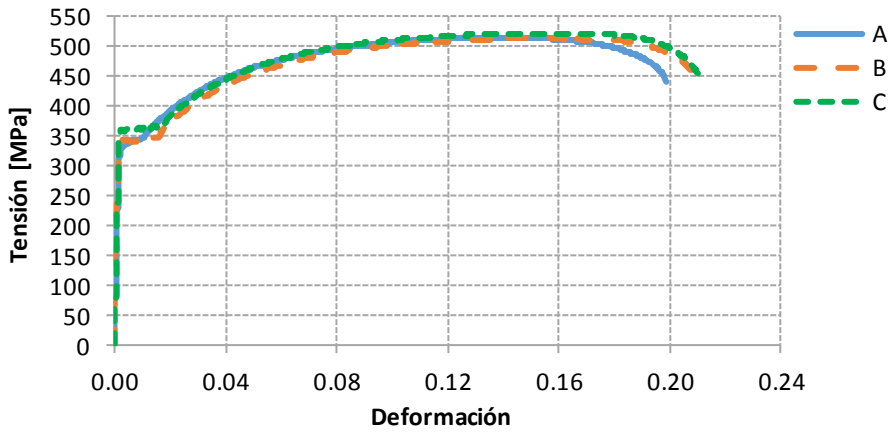


Fig. 5.4. Resultados del test de caracterización del acero de los limitadores de carga del ensayo experimental.

Una vez fabricados los limitadores de carga definidos, se realizaron dos pruebas (P1 y P2) previas a la realización del ensayo experimental definitivo. Estas pruebas consistieron en el ensayo de dos limitadores de carga de forma aislada tal y como se ha detallado en el Capítulo 4. Los resultados obtenidos se muestran en la Fig. 5.5, confirmando el mismo comportamiento de ambos limitadores de carga con una carga límite de 16.0kN.

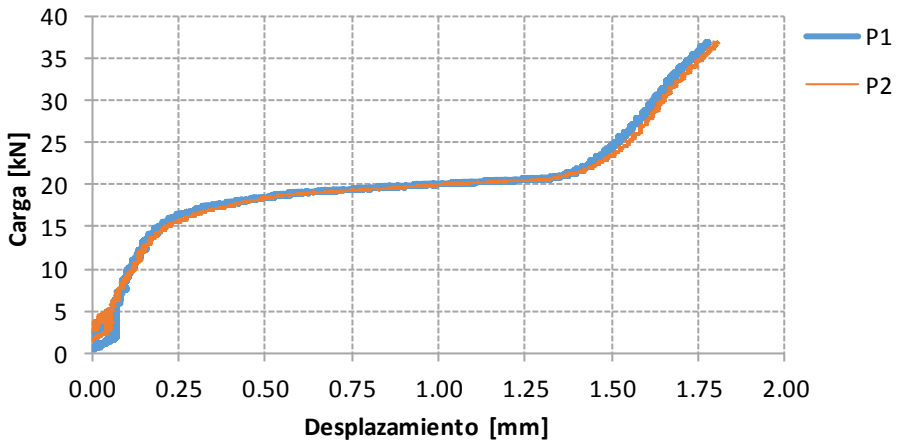


Fig. 5.5. Resultados de las pruebas realizadas a dos limitadores de carga.

5.2.5. Monitorización del ensayo

Durante el ensayo se registraron continuamente:

- La carga de los puntales mediante la medición de la deformación de la base del puntal.
- Las flechas en diferentes puntos del forjado.
- Las temperaturas en el interior del forjado, en probetas cilíndricas y la temperatura ambiente mediante termopares.

Las medidas de la temperatura fueron realmente importantes porque permitieron, como se analizará posteriormente, controlar la influencia de este parámetro en la evolución de las cargas de los puntales y del forjado. La gran influencia de la temperatura exigió:

- El control de la temperatura ambiente.
- El control de la temperatura del hormigón de los forjados y probetas.
- Disponer puntales de control, fuera de la construcción del ensayo experimental, para poder compensar la influencia de la temperatura en el sistema de monitorización de los puntales.

Se fijó una frecuencia de medidas de 1 dato cada 5 segundos durante la realización de las diferentes operaciones constructivas, y de 1 dato cada 5 minutos el resto del tiempo.

5.3. Preparación y descripción del ensayo

Antes del inicio del ensayo experimental se realizó una extensa preparación de la monitorización del ensayo que consistió en:

1. Preparación de cables y conexiones para galgas, captadores y termopares.
2. Preparación de las pértigas con los captadores de desplazamiento para medir las flechas del forjado durante el ensayo.
3. Pegado de galgas extensométricas en los puntales para medir la carga de cada puntal durante el ensayo.

Se presenta una descripción más detallada de la preparación del ensayo en el apartado “A1.3. Preparación del ensayo” del Apéndice 1. Tras la preparación del ensayo se instaló toda la monitorización y se procedió al desarrollo del ensayo experimental basado en la ejecución de una planta de un edificio.

5.3.1. Instalación de la monitorización

Los distintos dispositivos utilizados para la monitorización del edificio fueron los siguientes:

- Galgas extensométricas para conocer la carga de los puntales durante el ensayo. En la Fig. 5.6 se muestra la conexión realizada entre las galgas y las extensiones hasta la mesa de adquisición de datos.



Fig. 5.6. Caja de conexiones de las galgas con las extensiones hasta la mesa de adquisición de datos.

- Captadores de desplazamiento para conocer las flechas del forjado durante el ensayo.
- Termopares para conocer la evolución de la temperatura en el hormigón durante el ensayo y su influencia en los resultados.

La distribución de puntales y pértigas puede observarse en la Fig. 5.7 (izquierda). El criterio de numeración de puntales es el siguiente:

- El número corresponde al número de puntal.
- La letra “T” identifica aquellos puntales que tienen galgas extensométricas, y que por tanto se conoce su carga durante el ensayo experimental.
- La letra “L” identifica aquellos puntales que tienen limitador de carga.

La identificación de pértigas se realiza con la letra “C” seguida de un número que identifica el número de captador de desplazamiento.

Como se puede observar en la Fig. 5.7, tanto los puntales con limitador como las pértigas han sido colocada en las sopandas principales que constituyen aquellas líneas de puntales que permanecerán instaladas tras la operación de clareado. Esto permitirá conocer el comportamiento carga-desplazamiento de los puntales con limitador de carga con las medidas de los desplazamientos en puntos muy cercanos a los puntales.

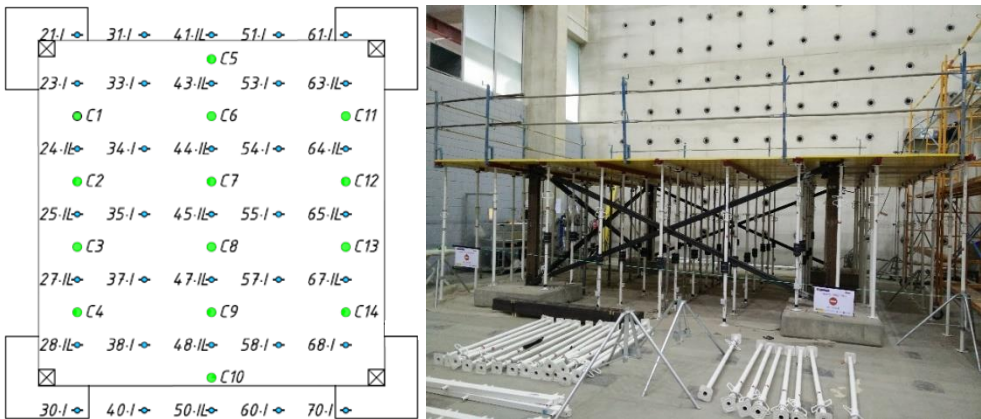


Fig. 5.7. Izquierda: puntales instrumentados (en azul) y captadores de desplazamiento (en verde).
 Derecha: Vista general de la instalación del sistema de cimbrado y de la monitorización.

En la Fig. 5.8 puede observarse la conexión de los cables de galgas extensométricas y captadores de desplazamiento a la mesa de adquisición de medidas.



Fig. 5.8. Conexión de los distintos dispositivos en la mesa de adquisición de datos.

Una vez hormigonada la losa, la instalación de los termopares embebidos en el hormigón se realizó tal y como aparece detallado en la Fig. 5.9. Distintos termopares fueron embebidos a distintas profundidades en la losa de hormigón con el objetivo de poder observar y analizar la temperatura del hormigón y los gradientes de temperatura. También se embebieron termopares en probetas de hormigón con el objetivo de poder evaluar la diferencia de temperatura experimentada por el hormigón de las probetas con la del hormigón de la losa.

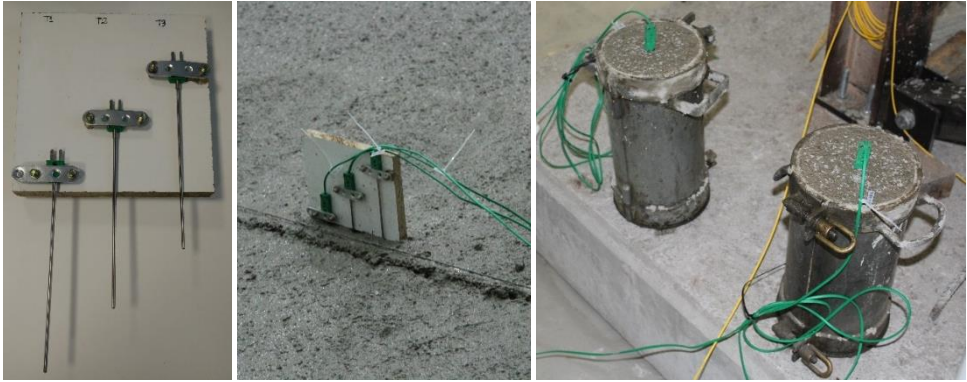


Fig. 5.9. Instalación de los termopares embebidos en el hormigón.

5.3.2. Descripción del ensayo

En este apartado se describirán los trabajos realizados de preparación de la estructura y la posterior realización del ensayo.

5.3.2.1. Preparación de la estructura y del sistema de apuntalamiento

A continuación aparece una enumeración de los pasos realizados para la preparación de la estructura y del sistema de apuntalamiento:

1. Posicionamiento de las zapatas y pilares metálicos atornillados (Fig. 5.10).



Fig. 5.10. Posicionamiento de las zapatas y los pilares metálicos.

2. Instalación de las cruces de San Andrés para conformar un sistema de apoyo rígido para la losa (Fig. 5.11).

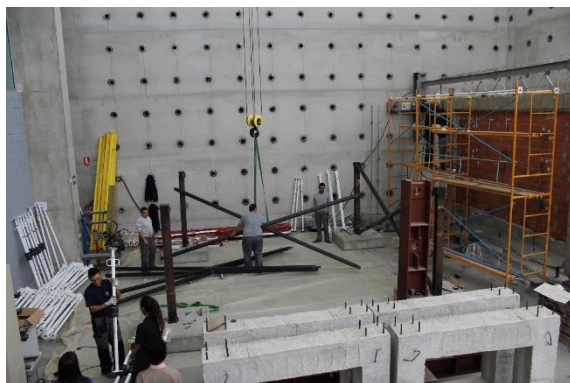


Fig. 5.11. Instalación de las cruces de San Andrés.

3. Instalación del sistema de cimbrado, incluyendo puntales instrumentados con y sin limitadores de carga, y pértigas con captadores de desplazamiento (Fig. 5.12 y Fig. 5.13).



Fig. 5.12. Instalación del sistema de cimbrado.

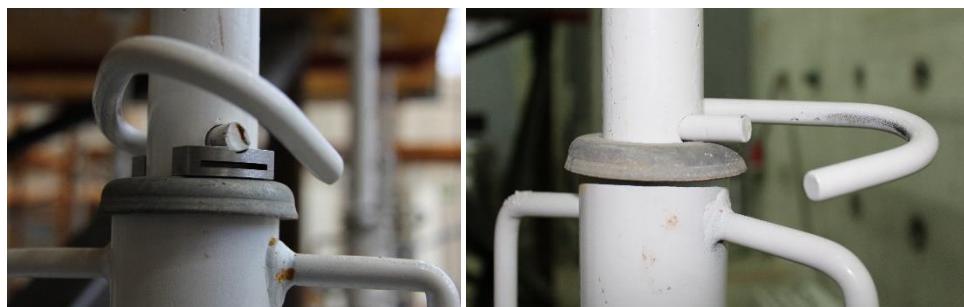


Fig. 5.13. Puntales con y sin limitadores de carga.

4. Inicio de las medidas en puntales y pértigas [Día -2 (se ha tomado como referencia el día 0 correspondiente al hormigonado de la losa)].
5. Armado y encofrado de la losa (Día -1 y Día 0) (Fig. 5.14).



Fig. 5.14. Armado y encofrado de la losa.

6. Inicio del ensayo experimental (Día 0).

5.3.2.2. Realización del ensayo

A continuación, aparece una enumeración de los pasos seguidos durante el ensayo:

- Hormigonado de la losa (Día 0 – 2 de diciembre de 2016). Vibrado del hormigón y fabricación de 30 probetas cilíndricas para el control de la evolución de las propiedades mecánicas del hormigón (Fig. 5.15).

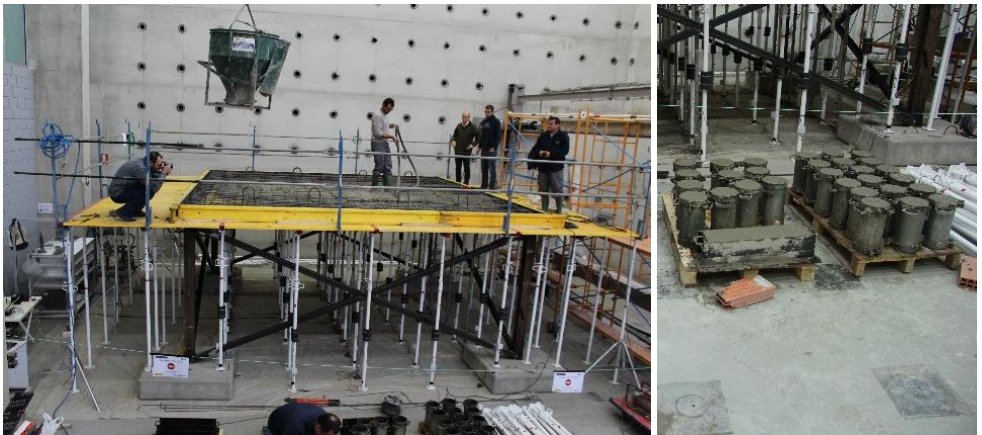


Fig. 5.15. Hormigonado de la losa y fabricación de probetas.

- Clareado de la losa (Día 3 – 5 de diciembre de 2016) (Fig. 5.16).
- Carga de arena sobre la losa para la disposición de 2.0kN/m^2 de sobrecarga, y replanteo de piscinas (Día 5 – 7 de diciembre de 2016) (Fig. 5.17).
- Carga de agua en piscinas (Día 7 – 9 de diciembre de 2016) (Fig. 5.18). 50cm de agua dispuesta a escalones de 10cm. Se consigue una sobrecarga de 5.0kN/m^2 que sumada a la sobrecarga de arena reproduce la sobrecarga total definida de 7.0kN/m^2 . Esta sobrecarga se correspondería al hormigonado de un segundo forjado cuyo peso propio es igual al del primer

forjado (5.0kN/m^2) más una sobrecarga de construcción de 1.0kN/m^2 en cada planta.



Fig. 5.16. Clareado de la losa.



Fig. 5.17. Carga de arena y replanteo de piscinas.



Fig. 5.18. Carga de agua en piscinas.

- En este punto se decidió realizar un ciclo de descarga y carga de agua para demostrar, bajo condiciones reales, la capacidad de reutilización de los limitadores de carga. Se realizó la descarga de agua de las piscinas hasta 15cm (Día 11 – 13 de diciembre de 2016).
- Carga de agua en las piscinas hasta 50cm (Día 12 – 14 de diciembre de 2016).
- Descarga de agua en las piscinas hasta 15cm (Día 12 – 14 de diciembre de 2016).
- Descimbrado del forjado manteniendo la carga de agua de 15cm (Día 13 – 15 de diciembre de 2016) (Fig. 5.19). Esta carga de agua más la carga de la arena suman un total de 3.5kN/m^2 , valor igual a la mitad de la carga total aplicada de 7.0kN/m^2 que intenta simular la carga de un hipotético sistema de apuntalamiento clareado de la hipotética planta 2. Es en este preciso momento en el que teóricamente se realiza el descimbrado para un proceso constructivo como el escogido en este ensayo experimental. En esta operación, las buenas prácticas recomiendan realizar el descimbrado, y por lo tanto desinstalar puntales, desde el centro de vano hacia los pilares. En este ensayo experimental, con el objetivo de estudiar las consecuencias de una mala práctica, se realizó el descimbrado desinstalando los puntales desde los más cercanos a los pilares hacia el puntal ubicado en el centro de vano de forma concéntrica. De esta forma se puede observar también el efecto favorable que tiene el limitador de carga en los casos en los que no se siguen las buenas prácticas.



Fig. 5.19. Descimbrado de la losa.

- Fin del ensayo.

5.3.2.3. Demolición de la losa y envío a vertedero

Una vez finalizado el ensayo se procedió a la demolición de la estructura. Dado que la losa de $5.25 \times 5.25 \times 0.20 \text{ m}^3$ tiene un peso de 13.8tn y excede la carga que puede soportar el puente grúa de las instalaciones de ICITECH (máx. 10.0tn), la losa fue cortada antes de ser transportada a vertedero. De forma previa se apeó el forjado con los mismos puntales que se utilizaron para el cimbrado de la losa, asegurándose que la losa quede apeada con un número elevado de puntales. Una vez cortada la losa en dos, fue levantada y cargada a un camión para ser transportada a vertedero. La Fig. 5.20 muestra el proceso de demolición y el levantamiento de la losa con ayuda de los ganchos de izado (ver planos en Apéndice 1, apartado “A1.2. Planos”).



Fig. 5.20. Demolición de la losa.

5.4. Resultados

En este apartado se presentan y analizan los resultados obtenidos. La recopilación completa de los resultados obtenidos se presenta en el Apéndice 1. Los resultados se presentan con el siguiente orden:

- Transmisión de cargas entre el forjado y los puntales.
- Cargas en puntales.
- Flechas en forjados en función del tiempo.
- Curvas fuerza-desplazamiento (F-d) de los puntales.
- Evolución de la temperatura del hormigón de la losa y del hormigón de las probetas cilíndricas.
- Evolución de las propiedades mecánicas del hormigón en el tiempo.
- Descimbrado.

5.4.1. Transmisión de cargas entre el forjado y los puntales

Por un lado, la densidad real del hormigón armado fue medida con los registros de los puntales tras el hormigonado de la losa, obteniendo un valor de 22.5kN/m^3 . Por otro lado, la densidad de la arena fue medida antes de su colocación mediante la obtención de diferentes muestras, obteniendo una densidad media de 13.6kN/m^3 . La colocación de la capa de arena con 17cm de espesor supuso finalmente una carga repartida de 2.3kN/m^2 . A partir de estos datos y los registros obtenidos, la transmisión de cargas entre el forjado y los puntales se presenta en la Tabla 5.1, donde se observan los valores de carga del forjado (Q), la carga de los puntales por unidad de superficie (S_{puntales}), y la carga máxima y carga media en puntales. Se puede observar como la carga máxima no supera los 17.7kN, utilizando limitadores de carga en puntales con carga límite de 16.0kN. Cabe recordar en este punto que la carga máxima esperada sin limitadores de carga superaba los 22.0kN. También se puede observar que el reparto de cargas entre forjados y puntales y la carga máxima son similares tras la aplicación del ciclo descarga-carga de agua.

Tabla 5.1. Transmisión de carga entre el forjado y los puntales durante el ensayo.

Operación	Q_{forjado} [kN/m ²]	S_{puntales} [kN/m ²]	$S_{\text{máx}}$ [kN]	S_{media} [kN]
Hormigonado	0.1	4.4	6.2	3.5
Clareado	0.3	4.2	10.6	6.4
Carga arena	1.5	5.4	13.2	8.2
Antes carga agua	1.9	4.9	12.4	7.5
Después carga agua	4.3	7.4	17.7	11.4
Descarga parcial agua	3.3	5.0	11.9	7.6
Carga agua	4.7	7.1	17.5	10.8
Descarga parcial agua	3.4	4.9	11.9	7.5
Descimbrado	8.3	0.0	0.0	0.0

5.4.2. Cargas en puntales

5.4.2.1. Influencia de la temperatura. Compensación

Como se ha comentado anteriormente, las cargas en puntales se miden de forma indirecta con la medición de la deformación de los cuerpos de los puntales mediante 3 galgas extensométricas. Este sistema de medida viene ligeramente influenciado por la temperatura. La variación de la temperatura ambiente en obra suele ser significativa entre los valores diarios y los valores nocturnos, variando también notablemente durante la construcción de todo un edificio. En el caso de este edificio, que se desarrolla dentro de las instalaciones de los laboratorios del ICITECH, las variaciones de temperatura registradas fueron menores a las esperadas. Consecuentemente, la influencia de este parámetro fue también menos importante. En la Fig. 5.21 se muestra la variación de temperatura y humedad relativa durante la realización del ensayo experimental.

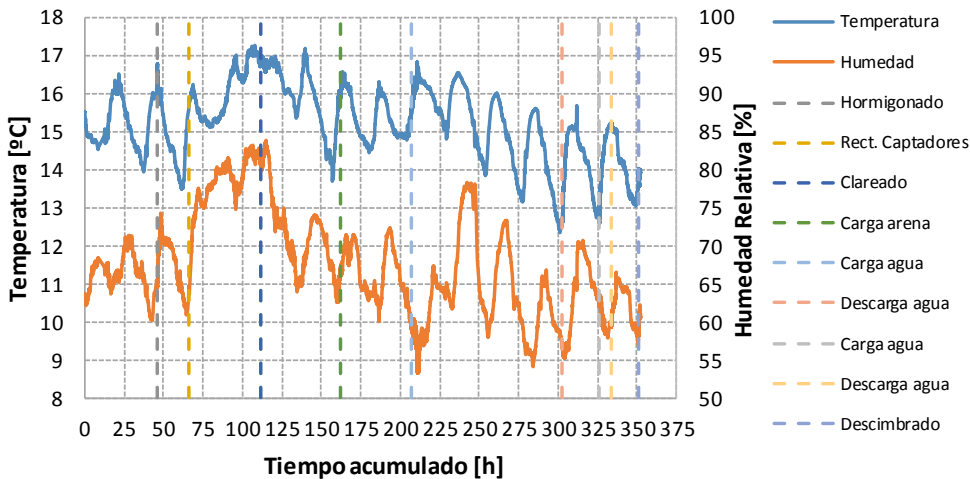


Fig. 5.21. Temperatura y humedad relativa del ambiente durante el ensayo.

Para compensar esta influencia, y como habitualmente se realiza en todos los sistemas de monitorización, se instrumentaron, además de los puntales bajo el forjado, otros 4 puntales totalmente descargados que se ubicaron al lado del edificio. De esta forma se puede conocer cómo afecta la temperatura al sistema de medida en las condiciones en las que está instalado el sistema de monitorización, es decir, las galgas pegadas a los puntales y con los 3 sistemas de protección detallados anteriormente. En la Fig. 5.22 se muestra una fotografía de los puntales que se utilizaron como referencia para conocer la influencia de la temperatura en el sistema de medida.



Fig. 5.22. Puntales de control de la temperatura.

En la Fig. 5.23 se muestran los resultados de estos puntales de referencia (PM1, PM2, PM3 y PM4). Como se puede observar, debido a los cambios en la temperatura ambiente, la carga de los puntales varía sin ser sometidos a ninguna acción. La máxima variación registrada fue de 1.2kN. Conocida y cuantificada esta variación, los registros de la carga real de los puntales bajo el forjado se modificaron restándole, en cada punto, el promedio de la carga registrada por los puntales de compensación de la temperatura. De esta forma se asegura que la carga de los puntales es realmente la carga que están soportando, y se elimina la influencia y evolución cíclica de la temperatura en los registros finales de los puntales.

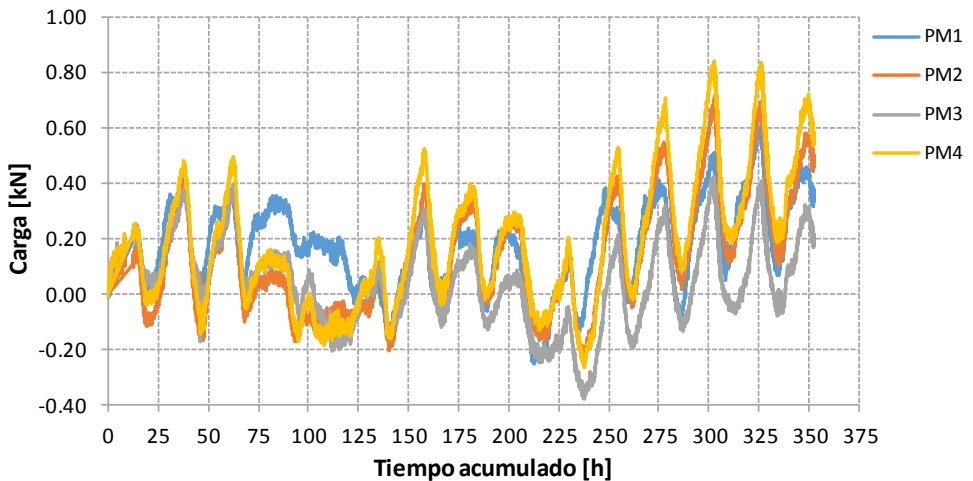


Fig. 5.23. Variación de la carga de los puntales de control de la temperatura.

5.4.2.2. Cargas en puntales

Realizada esta modificación, se ha representado la carga de los puntales bajo el forjado en función del tiempo. Todos los registros aparecen representados en el Apéndice 1, apartado “A1.4. Cargas en puntales”. A continuación, la Fig. 5.24 presenta el registro del puntal 65 tomado como ejemplo.

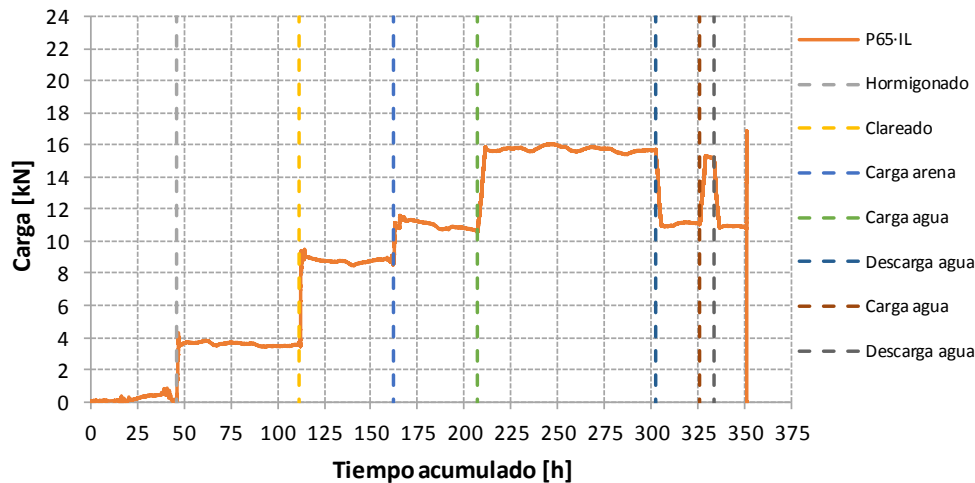


Fig. 5.25. Estado del limitador de carga del puntal 65.

En la Fig. 5.24 se puede observar como la carga del puntal experimentó aumentos de la carga en las distintas operaciones constructivas (hormigonado, clareado, arena,

agua y descimbrado). También se puede destacar que el puntal con limitadores de carga instalados se comportó de forma idónea. De hecho, ante situaciones de carga-descarga, el puntal recuperó la carga introducida y volvió a cargarse hasta niveles similares a la situación anterior a la descarga. El nivel de carga máxima alcanzado se mantiene también en niveles reducidos, validando experimentalmente el funcionamiento de los limitadores de carga bajo condiciones reales. La Fig. 5.25 muestra el estado final del limitador de carga del puntal 65 en el momento que recibe la carga máxima, y cómo el limitador de carga ha iniciado el comportamiento plástico que limita la carga que este puntal recibe.

5.4.2.3. Momentos en puntales

La instalación de 3 galgas extensométricas en los puntales permite también conocer la excentricidad de la carga. Con la medida de la deformación en 3 puntos de una misma sección se conoce el plano de deformaciones, que a su vez determina, además de la carga axial (N), cuál es su excentricidad (e) o cuál es el momento (M) que recibe el puntal ($M = N \cdot e$). Para la determinación de los momentos según la dirección marcada por el pasador (X) y la dirección perpendicular (Y), se replanteó la posición del pasador en cada uno de los puntales respecto a las diferentes galgas extensométricas. En la Fig. 5.26 se muestra un esquema genérico del posicionamiento del pasador respecto a las tres galgas extensométricas. De esta forma se puede obtener, además de la carga de compresión del puntal (N), los momentos que reciben los puntales según el eje marcado por el pasador (M_x), el eje perpendicular a este último (M_y) y según la fibra neutra con la que se obtendrá el momento máximo ($M_{máx}$).

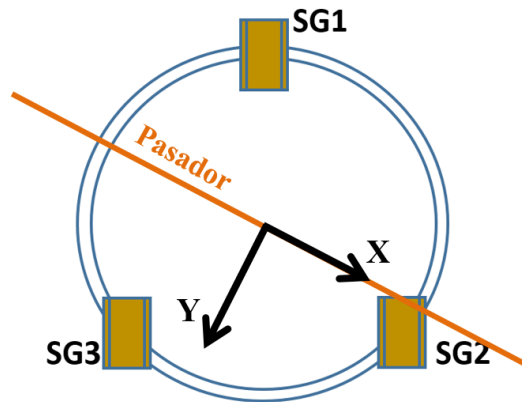


Fig. 5.26. Posicionamiento de ejes para el cálculo de los momentos en los puntales a partir de la medida de la deformación axial del puntal mediante las tres galgas extensométricas.

El interés de la obtención de los momentos en puntales se justifica desde diversos puntos de vista:

- Cuantificación del valor de los momentos que reciben los puntales durante la construcción de estructuras de edificio. Dicha cuantificación permitirá conocer de mejor forma cuál es el estado tensional de estos elementos y establecer mejor la naturaleza de las acciones que reciben los puntales.
- Efecto de los limitadores de carga en la excentricidad de la carga de compresión de los puntales. Su efecto se debería observar sobre todo en los momentos de eje y. Frente a grandes excentricidades de la carga ($M_y - e_y$), la pareja de elementos del limitador de carga no inicia el comportamiento plástico de forma simultánea, reduciendo consecuentemente la excentricidad de la carga en esta dirección.

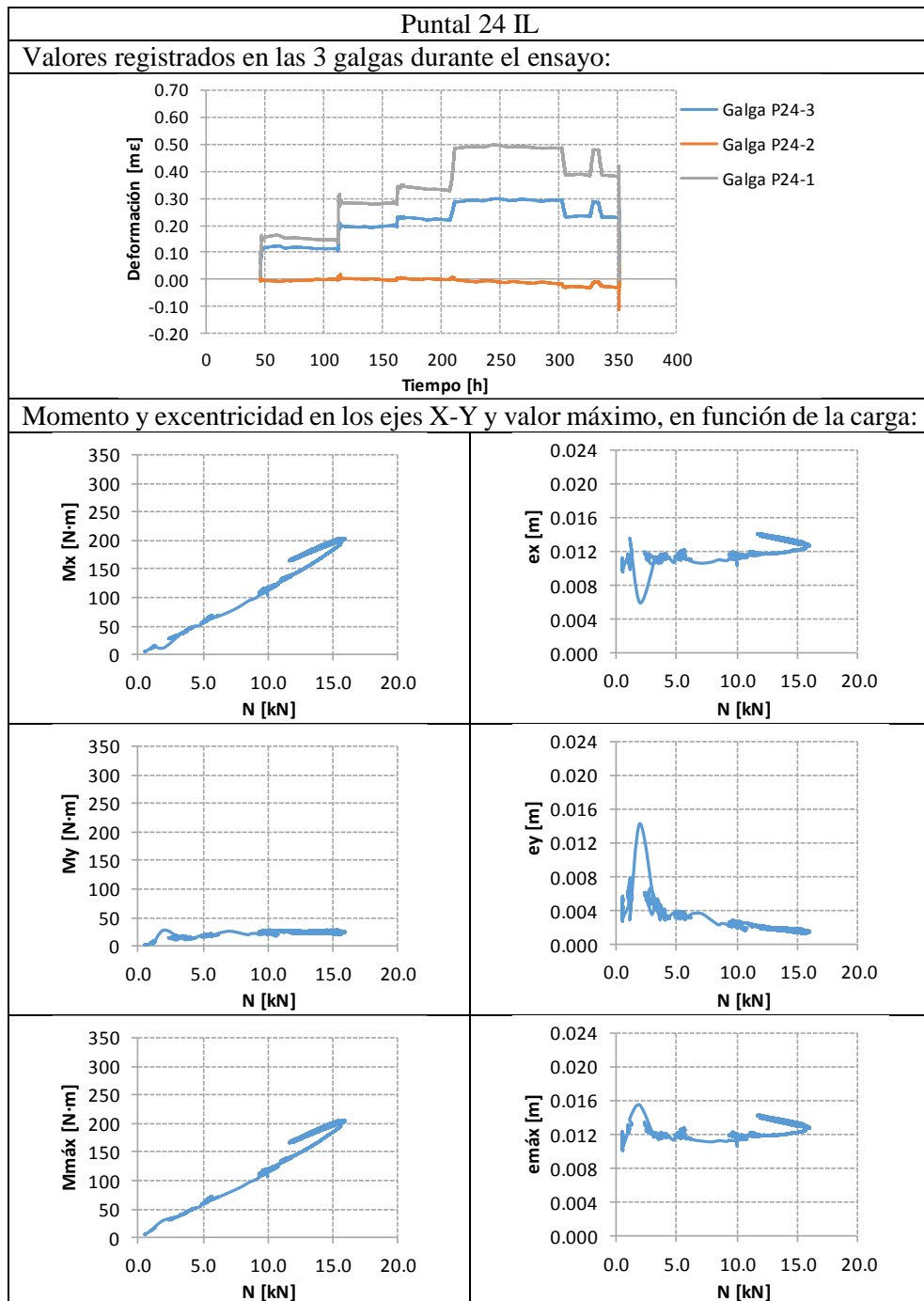
La metodología de cálculo y los resultados obtenidos aparecen detallados en el Apéndice 1, apartado “A1.5. Momentos en puntales”. A continuación, la Tabla 5.2 presenta, como ejemplo, los resultados obtenidos para el puntal 24. Generalmente, los resultados demuestran que:

- Para cargas reducidas ($< 5.0\text{kN}$), las excentricidades son muy elevadas debido a la inclinación de las bases del puntal respecto al cuerpo y la caña del mismo. Estas excentricidades se reducen drásticamente cuando dichas bases se deforman pasando a ser planas y perpendiculares al cuerpo y la caña de los puntales.
- Las excentricidades superiores a los 11mm generan tracciones en el cuerpo de los puntales. Estas tracciones se pueden observar en las deformaciones negativas de alguna de las tres galgas instaladas en cada puntal.
- Ante limitadores de carga de 16.0kN, la reducción de elevadas excentricidades de la carga ($M_y - e_y$) debería observarse a partir de 8.0-10.0kN de carga de compresión de los puntales. En el caso extremo, solo un elemento del limitador de carga recibiría toda la carga del puntal y, consecuentemente, iniciaría su comportamiento plástico en valores alrededor a 8.0kN. Aunque el efecto del limitador de carga en los resultados obtenidos no ha sido significativo, en ninguno de los casos ha presentado una componente negativa. Incluso su efecto ha sido favorable, en algunos casos, reduciendo ligeramente la excentricidad de la carga que produce momentos de eje Y.

5.4.3. Flechas en forjados

Como se ha comentado anteriormente, el dispositivo utilizado para registrar las flechas en los forjados han sido los captadores de desplazamientos instalados en las pértigas bajo las sopandas principales. Se han instalado en esta posición porque son los únicos puntos fijos bajo el forjado que se mantienen durante todo el ensayo. El resto de puntos en los que se podría apoyar las pértigas serían las sopandas secundarias y los tableros de encofrado. Sin embargo, ambos se retiran en la operación de clareado de la losa.

Tabla 5.2. Momentos y excentricidades de la carga de eje X e Y, y valor máximo, en función de la carga axial del puntal 24.



Durante el hormigonado de la losa, diversas pértigas se movieron de su situación inicial debido a los movimientos que causa el vertido del hormigón en la cimbra. A la mañana siguiente (Día 01 – 3 de diciembre de 2016) se volvieron a colocar en su situación inicial. En los gráficos se ha identificado esta modificación como “Rect. Captadores”. Los registros de los 14 captadores aparecen en el Apéndice 1, apartado “A1.6. Flechas en forjados”. A continuación, la Fig. 5.27 presenta un registro tomado como ejemplo.

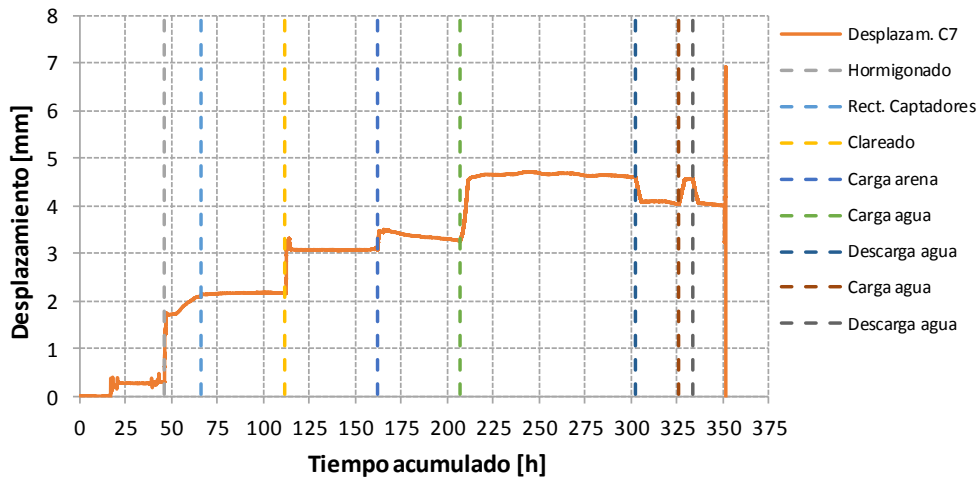


Fig. 5.27. Flecha registrada por el captador C7 durante el ensayo.

De forma similar a la carga de los puntales, en la Fig. 5.27 se puede observar como la flecha aumenta en las distintas operaciones constructivas (hormigonado, clareado, arena, agua). Además, ante situaciones de carga-descarga, se ha recuperado parte de la flecha y se ha vuelto a deformar hasta niveles similares a la situación anterior a la descarga. Esto ocurre incluso en aquellos limitadores de carga que presentaron comportamiento plástico. La flecha, en estos casos, es ligeramente superior respecto a una hipotética situación sin limitadores de carga debido al comportamiento plástico de dichos elementos. El ciclo descarga-carga-descarga de agua reprodujo los mismos valores de flecha de forma repetitiva, demostrando así la reutilización de limitadores de carga en puntales bajo condiciones reales.

5.4.4. Curvas fuerza-desplazamiento de los puntales

En este sub-apartado se ha obtenido las cargas de los puntales respecto al desplazamiento promedio de las pértigas contiguas a cada puntal. Teniendo en cuenta que los puntales tienen instalados limitadores de carga, y por tanto el comportamiento global del conjunto puntal-limitador es un comportamiento elasto-plástico, este resultado mostrará el comportamiento de los puntales con limitadores de carga ante situaciones reales. En el Apéndice 1, apartado “A1.7. Curvas fuerza-

desplazamiento de puntales”, se presentan todos los gráficos fuerza-desplazamiento (F-d) de los puntales. A continuación, la Fig. 5.28 presenta, como ejemplo, los resultados obtenidos para el puntal más cargado (puntal 43). Aunque la carga máxima se esperaba en el puntal de centro de vano (puntal 45), el valor máximo se registró en el puntal 43. En el Capítulo 6 se justifican y analizan las causas de la aparición de la carga máxima en este puntal.

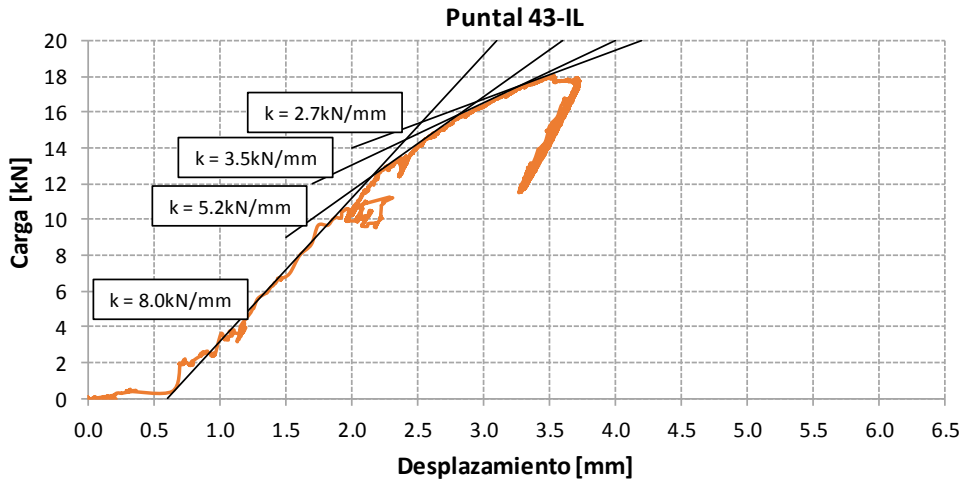


Fig. 5.28. Comportamiento del puntal 43 con limitadores de carga durante el ensayo.



Fig. 5.29. Estado del limitador del puntal 43 en el momento que recibe la carga máxima.

Como se puede observar en la Fig. 5.28, el puntal 43 tiene un comportamiento totalmente lineal para cargas reducidas. No ocurre lo mismo para cargas más elevadas. Como se observa en la gráfica, a partir de 16.0kN (carga límite de los limitadores de carga utilizados en el ensayo experimental) el puntal presenta un claro comportamiento no-lineal, siendo la rigidez “k” (pendiente de la curva) cada vez menor con una tendencia a la horizontalidad. Este comportamiento implica que este puntal dejó de absorber más carga porque su rigidez fue significativamente reducida, redistribuyendo la carga en exceso que hubiera recibido en el caso de no utilizar limitadores de carga hacia los puntales vecinos a través del forjado. El estado final del limitador de carga del puntal más cargado (puntal 43) en el momento que recibe la carga máxima se muestra en la Fig. 5.29.

5.4.5. Evolución de la temperatura del hormigón en la losa y en las probetas cilíndricas

En este apartado se presenta la evolución de la temperatura del hormigón de la losa y de las probetas cilíndricas fabricadas para el control de calidad y el control de la temperatura del hormigón. El registro de esta temperatura se ha realizado a través de los termopares, tal y como ha sido detallado anteriormente.

En la Fig. 5.30 se muestra un esquema de dónde han sido ubicados los termopares en la losa junto con detalles fotográficos de su colocación. Los termopares T1 a T3 se colocaron a diferentes profundidades del espesor del forjado con tal de medir el gradiente de temperatura existente entre la cara inferior y superior del forjado. El termopar T4 se colocó a una profundidad igual a la mitad del canto de la losa con el objetivo de medir la temperatura de la losa en otro punto.

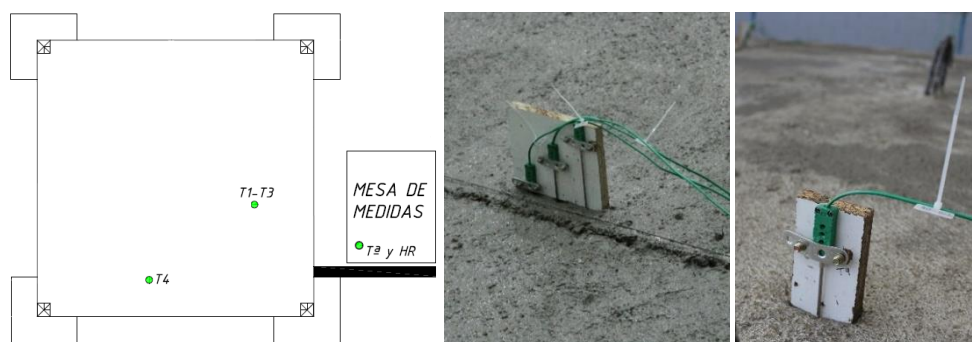


Fig. 5.30. Distribución de termopares en la losa (T1 a 15cm es el más profundo; T2 y T4 a 10cm están en el centro de la sección; y T3 a 5 cm es el más superficial).

En la Fig. 5.31 se muestra el registro de temperatura del hormigón de los termopares T1 a T3 durante el ensayo. Se puede observar que, tras el hormigonado, y como resulta habitual en el proceso exotérmico de fraguado del hormigón, la temperatura en el interior del hormigón crece sustancialmente hasta los 30°C, para luego

descender hasta una temperatura similar a la temperatura ambiente sufriendo las distintas variaciones diarias de temperatura entre el día y la noche.

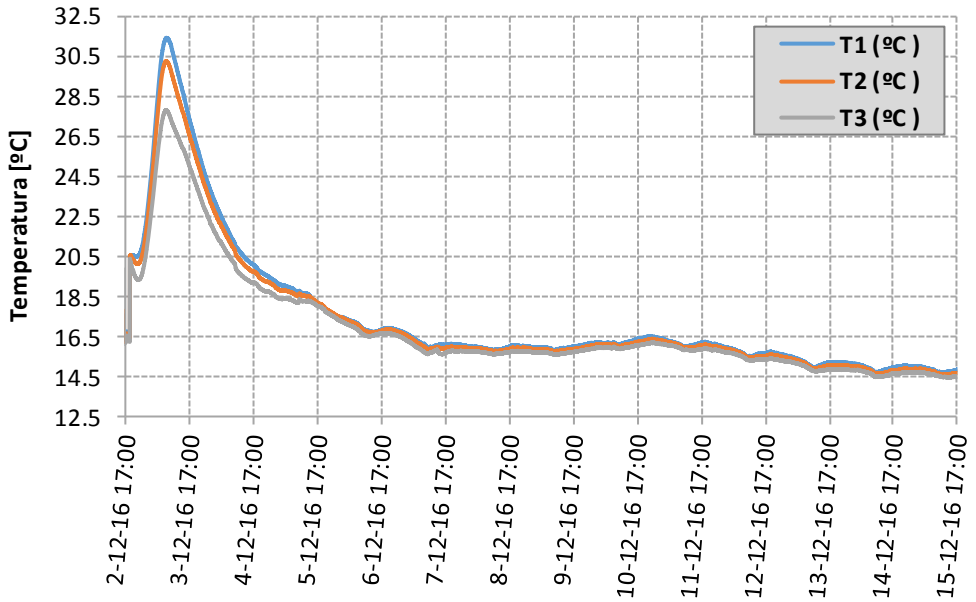


Fig. 5.31. Temperatura registrada en los termopares 1, 2 y 3.

Con el objetivo de estudiar la posible deformabilidad del forjado que podría producir un ascenso o descenso de la carga de los puntales debido a las diferencias de temperatura entre la fibra superior e inferior de la losa, en la Fig. 5.32 se ha representado el gradiente de temperatura como la diferencia de temperatura entre los termopares T1 y T3. Se puede observar que, tras el proceso exotérmico de fraguado del hormigón, también el gradiente sufrió variaciones cíclicas de forma diaria. Sin embargo, tras la disposición de la capa de arena al mediodía del día 7 de diciembre, se puede observar una anomalía en el gradiente que se confirma en el registro de temperaturas mostrado a la derecha de la Fig. 5.32. De ambos gráficos puede deducirse que la disposición de la capa de arena produjo un enfriamiento de la parte superior de la losa, suavizándose durante los dos días siguientes a la disposición de la arena. La reducción de este gradiente durante estos dos días provocó que la losa se deforme de forma inversa a como se deforma mediante la aplicación de una carga gravitatoria, es decir, asciende en su parte central quedándose apoyada en los pilares. Este efecto provocó una reducción en la carga de los puntales centrales que se ha podido observar en los resultados representados en el Apéndice 1, apartado “A1.4. Cargas en puntales”, tras la aplicación de la arena.

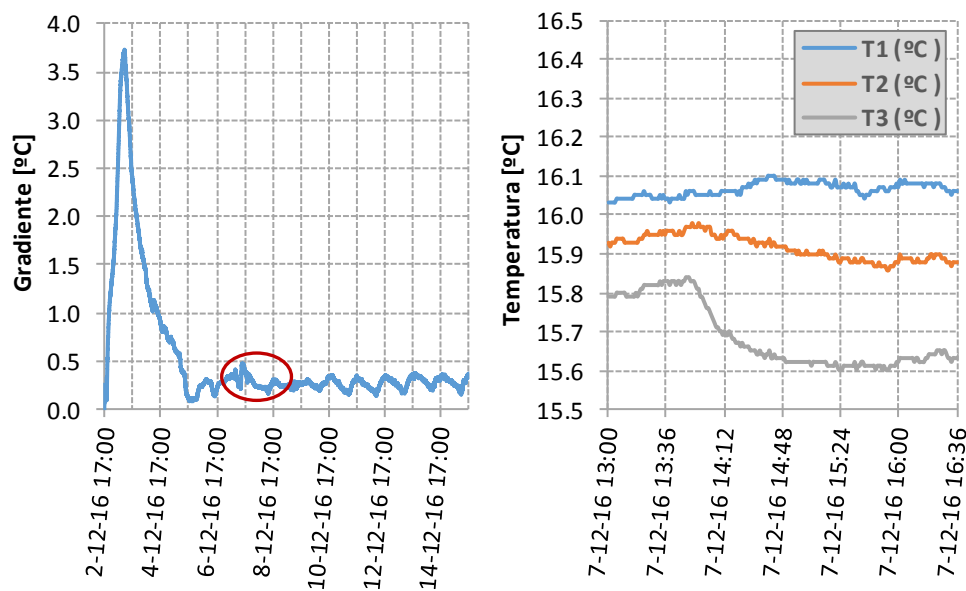


Fig. 5.32. Cambios en el gradiente y la temperatura tras la disposición de la carga de arena.

Con el objetivo adicional de comparar la temperatura del hormigón de la losa con la temperatura del hormigón de las probetas cilíndricas (ver termopares instalados en la Fig. 5.33), en la Fig. 5.34 se representa la temperatura del hormigón en el centro de la sección de la losa (termopares T2 y T4) y la temperatura del hormigón de dos probetas cilíndricas (termopares T5 y T6).



Fig. 5.33. Termopares T5 y T6 instalados en probetas cilíndricas.

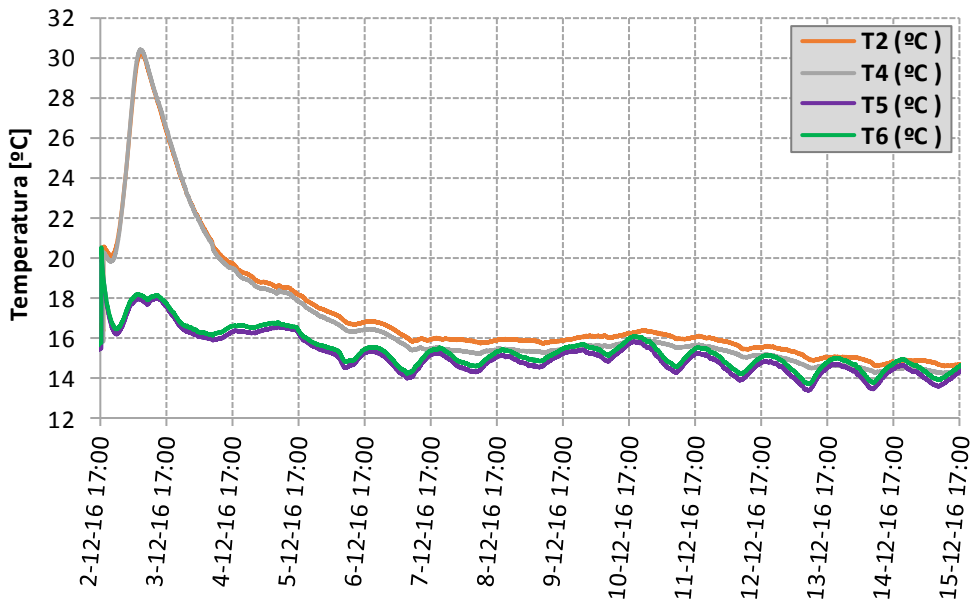


Fig. 5.34. Comparación de las temperaturas de la losa (termopares 2 y 4) y las temperaturas en las probetas (termopares 5 y 6).

Se puede observar que la temperatura de la losa es siempre superior a la de las probetas. Consecuentemente, las propiedades mecánicas del hormigón de la losa evolucionaron de forma más rápida que las de las probetas. También puede observarse cómo el hormigón de las probetas cilíndricas se ve sometido a mayores variaciones diarias de temperatura por ser un elemento de menores dimensiones, y por tanto más susceptible a los cambios en las condiciones ambientales. A partir de estos resultados se evidencian las diferencias en la evolución de las propiedades mecánicas del hormigón de las probetas y el hormigón de la losa que ponen en duda la adecuación del control de calidad del hormigón basado en el ensayo de probetas cilíndricas. Sin embargo, esta metodología queda del lado de la seguridad porque las probetas cilíndricas presentan una evolución más lenta, asegurando que la resistencia del hormigón es siempre mayor en la losa que en las probetas.

5.4.6. Evolución de las propiedades mecánicas del hormigón en el tiempo

Como se ha comentado anteriormente, para el control de las propiedades mecánicas del hormigón en el tiempo se han utilizado probetas cilíndricas. Estas probetas han sido ensayadas los mismos días en los que se realizaba una operación constructiva, y también a 28 días. Los ensayos realizados fueron (véase Fig. 5.35):

- Ensayo a compresión según UNE-EN 12390-3:2009/AC.

- Módulo de Young según UNE-EN 12390-13:2014.
- Ensaño brasileño (tracción indirecta) según UNE-EN 12390-6:2010.



Fig. 5.35. Fotografías de las probetas durante los ensayos a compresión, del módulo de elasticidad y de tracción indirecta.

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 5.3 y la Tabla 5.4. La realización de estos ensayos permitió tomar la decisión de ejecutar las diferentes operaciones constructivas en los plazos previstos y con total seguridad. Estos ensayos también permitieron tener controlada la evolución de las propiedades mecánicas del hormigón y comprobar la calidad del hormigón suministrado (HA-25).

Tabla 5.3. Resultados de los ensayos a compresión y del módulo de Young o módulo de elasticidad.

Día	Probeta	Resistencia a compresión [MPa]	Módulo de elasticidad [MPa]
	1	19.1	---
Día 3	2	20.6	28996
Clareado	3	19.3	26622
	4	20.3	27714
	8	25.8	---
Día 7	9	26.9	29424
Carga agua	10	28.0	29673
	11	23.7	30918
	15	31.5	---
Día 13	16	20.8*	31707
Descimbrado	17	31.5	26602
	18	27.1	26300
	22	33.4	---
Día 28	23	32.0	31274
	24	34.8	37157
	25	33.4	46500*

* Datos anómalos

Tabla 5.4. Resultados de los ensayos de tracción indirecta (brasileño).

Fecha	Probeta	Resistencia a tracción [kN]
Día 3 Clareado	5	129.9
	6	150.1
	7	154.5
Día 7 Carga	12	182.4
	13	133.0
	14	178.4
Día 13 Descimbrado	19	168.5
	20	127.5
	21	190.7
Día 28	26	175.4
	27	164.0
	28	200.2

5.4.7. Descimbrado

El descimbrado de la losa fue la última operación constructiva del ensayo experimental. Las buenas prácticas establecen que el descimbrado debe realizarse desde los puntales situados en centro de vano hacia los puntales ubicados cerca de los pilares con el objetivo de no producir sobrecargas inesperadas en los puntales. Sin embargo, durante las operaciones de descimbrado, y sobre todo en aquellos casos de plantas con muchos vanos, los operarios retiran los puntales de una forma más o menos arbitraria. En algunos casos, la secuencia de retirada de los puntales es totalmente opuesta a la recomendada, produciendo sobrecargas en puntales que pueden alcanzar su punto de rotura.

El limitador de carga en puntales evita las sobrecargas en los mismos, acotando la máxima carga que recibe un puntal por debajo de la carga límite de los limitadores. Siendo esta la función principal de los limitadores, el objetivo de este sub-apartado consiste en comprobar la eficacia de los limitadores de carga frente a secuencias de descimbrado totalmente opuestas a las recomendadas.

En la Fig. 5.36 se muestra la secuencia de descimbrado seguida en el ensayo, retirando los puntales desde los pilares hasta el centro de vano, buscando sobrecargar el puntal situado en el centro de vano (puntal 45). La retirada de los puntales se realizó de forma concéntrica al centro de vano, retirando los puntales según la secuencia indicada, desde la circunferencia C1 hasta la C4. Finalmente se retiraron los puntales vecinos al puntal de centro de vano (puntales identificados en la secuencia de descimbrado como el nº 16 y el nº 17).

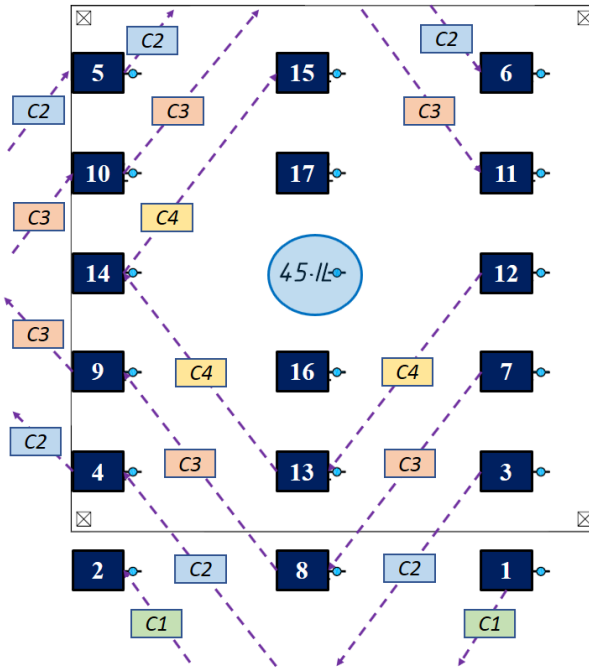


Fig. 5.36. Secuencia de descimbrado de forma inversa a las recomendaciones establecidas como buenas prácticas.

En el Apéndice 1, apartado “A1.8. Secuencias descimbrado y cargas en puntales”, se muestran las secuencias de descimbrado, con un detalle del estado del limitador de carga y del incremento de carga del puntal 45 tras la retirada de cada uno de los 17 puntales vecinos. También se presenta, para cada puntal, las sobrecargas registradas durante el proceso de recimbrado con la retirada de los 18 puntales instalados.

En la Fig. 5.37 se presenta, a modo de ejemplo, las sobrecargas registradas en el puntal 45 durante el descimbrado. De estos resultados, junto con los observados en el Apéndice 1, se puede observar que la carga del puntal 45 se mantiene por debajo de los 18.0kN hasta el descimbrado del último de los puntales vecinos. En la retirada de este último puntal se agotó el máximo desplazamiento plástico permitido del limitador (véase Fig. 5.38), alcanzando una carga de 21.4kN.

Las sobrecargas registradas fueron reducidas debido a la presencia del limitador de carga en puntales. De lo contrario, las sobrecargas de los puntales hubieran sido muy superiores. En el Capítulo 6 se realiza un estudio numérico sobre qué hubiera ocurrido en este mismo ensayo experimental de no haber utilizado limitadores de carga en los puntales. Se demostrará y cuantificará entonces las elevadas sobrecargas que hubieran experimentado los puntales sin limitadores de carga siguiendo la secuencia de descimbrado establecida.

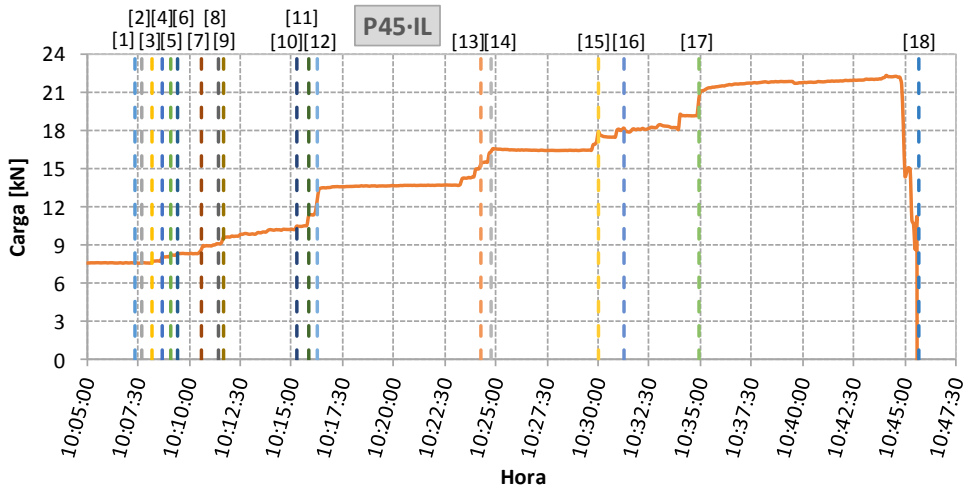


Fig. 5.37. Sobrecargas registradas en el puntal de centro de vano con limitadores de carga instalados de 16.0kN durante el descimbrado.



Fig. 5.38. Estado del limitador de carga del puntal 45 al final de la operación de descimbrado.

5.5. Conclusiones

Tras los resultados obtenidos del ensayo experimental, el limitador de carga ha presentado un comportamiento adecuado, demostrando su posible aplicación y reutilización bajo condiciones reales. El uso de estos limitadores de carga presenta numerosas ventajas objetivas respecto al sistema de cimbrado tradicional. Las ventajas del uso del limitador de carga son:

- Aumenta la seguridad durante la construcción de edificios al evitar la rotura de los puntales durante la construcción y mantener la carga que reciben por debajo de la carga admisible de los mismos. Se ha podido observar cómo el limitador de carga ha cumplido su función de limitar la carga del puntal de forma eficaz.
- Se aprovecha en mayor medida la capacidad resistente de todos los puntales utilizados. Es decir, una mayor cantidad de puntales trabajan a una carga similar (y menor a la carga máxima que hubieran registrado sin limitadores de carga), aprovechando la capacidad resistente del conjunto de puntales. De lo contrario, todo el sistema de apuntalamiento debería haber sido dimensionado para la carga máxima del puntal más cargado estando el resto de puntales sobredimensionados.
- Se permite utilizar puntales con capacidades resistentes inferiores, lo que directamente se traduce en puntales más económicos. También permite reducir el número de puntales totales utilizados ya que los finalmente instalados tienen limitada su carga y no supone un problema en la seguridad.
- Los momentos registrados en puntales durante la ejecución del ensayo experimental fueron elevados, incluso con un control exhaustivo de la verticalidad de los puntales en su instalación. La excentricidad de la carga medida fue elevada, llegando a registrar deformaciones de tracción en alguna de las tres galgas extensométricas instaladas en las bases de los puntales. El uso de limitadores de carga no ha empeorado esta situación. De hecho, se han registrado efectos favorables en el uso de los limitadores de carga que han reducido ligeramente la magnitud del momento registrado en los puntales. Este efecto positivo hubiera sido todavía más pronunciado si el ensayo no se hubiera realizado en condiciones controladas en un laboratorio, donde se controló exhaustivamente la verticalidad de los puntales.
- Se ha observado que, aunque el descimbrado se haya realizado desde los pilares hacia el centro de vano, de forma inversa a la generalmente recomendada, ningún puntal se ha sobrecargado debido a la limitación de la

carga máxima de los limitadores de carga. Estos limitadores de carga han mantenido la carga de los puntales por debajo de los 19.0kN hasta agotar el máximo desplazamiento plástico permitido, momento en el que la carga máxima alcanzó los 21.4kN

Como se puede observar, las ventajas de los limitadores de carga han sido muy diversas y se ha demostrado el buen comportamiento y la posible reutilización de los limitadores de carga bajo condiciones reales. Todas las ventajas son realmente importantes para la industria con el objetivo de mejorar los procesos constructivos desde todos los puntos de vista: economía, seguridad, calidad y eficiencia.

CAPÍTULO 6. ESTIMACIÓN DE LAS MEJORAS INTRODUCIDAS POR EL USO DE LIMITADORES DE CARGA DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURAS DE EDIFICIOS

6.1. Introducción

En este capítulo se presenta el análisis mediante simulación numérica del efecto positivo de la introducción de limitadores de carga en puntales. Este efecto positivo, ampliamente tratado en el desarrollo de esta tesis doctoral, se analiza en detalle desde diferentes puntos de vista:

- Qué hubiera ocurrido durante el ensayo experimental si no se hubieran utilizado limitadores de carga.
- Qué hubiera ocurrido durante el descimbrado del ensayo experimental si no se hubieran empleado limitadores de carga.
- Qué efecto tienen los limitadores de carga en puntales frente al colapso progresivo del sistema de apuntalamiento en situaciones accidentales durante la construcción de estructuras de edificios.

Para analizar estos aspectos en detalle y de una forma adecuada se requiere de modelos numéricos calibrados y validados. Para el análisis de los dos primeros puntos se requiere de la calibración y validación previa del modelo numérico desarrollado para el ensayo experimental. Para el análisis del tercer punto se ha empleado un modelo numérico ampliamente validado en estudios anteriores. A continuación, aparecen todos estos puntos tratados en profundidad.

6.2. Calibración y comprobación del modelo numérico del ensayo experimental

6.2.1. Calibración del modelo numérico

El modelo numérico empleado en este capítulo es el utilizado para el diseño del ensayo, detallado en el Capítulo 5, apartado “5.2.3. Modelo de elementos finitos”. A este modelo numérico se le ajustaron los cambios geométricos finalmente adoptados

en el ensayo experimental y se introdujeron todas las operaciones constructivas realizadas, el módulo de elasticidad real del hormigón y el comportamiento real de cada uno de los puntales utilizados.

La Fig. 6.1 muestra la evolución del módulo de elasticidad del ensayo experimental medido mediante ensayos los días 3, 7, 13 y 28. A esta evolución discreta del módulo de elasticidad se le ha realizado un ajuste logarítmico para obtener el valor del módulo de elasticidad real cualquier día del ensayo. El ajuste realizado presenta un r-cuadrado muy elevado, representado la validez del ajuste realizado. Esta evolución del módulo de elasticidad se ha comparado también con la propuesta por las dos normativas de referencia en España, la EHE-08 [108] y el EC-2 [128]. La comparación realizada muestra que la evolución del módulo de elasticidad real del ensayo experimental es muy cercana a la propuesta por el EC-2, quedando la propuesta por la EHE-08 muy por debajo de los valores reales.

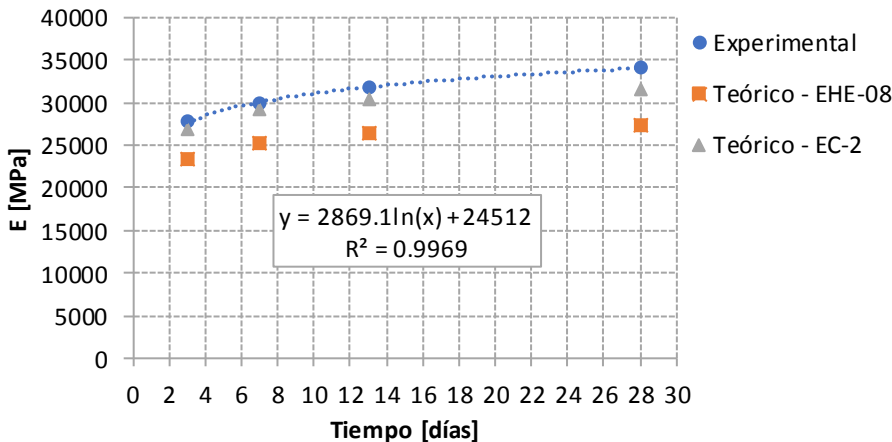


Fig. 6.1. Evolución del módulo de elasticidad del hormigón del ensayo experimental, ajuste obtenido para los modelos numéricos y comparación con la evolución marcada por las normativas de referencia (EHE-08 [108] y EC-2 [128]).

Definida la evolución del módulo de elasticidad y los diferentes ajustes geométricos realizados en el modelo, debe seguidamente establecerse el comportamiento real de los puntales con y sin limitadores de carga utilizados en el ensayo, como último paso para proceder a la calibración del modelo numérico. El comportamiento real de los puntales en el modelo numérico se establece mediante la definición del comportamiento tenso-deformacional y el área equivalente de cada puntal.

Los puntales sin limitadores de carga (correspondientes a los instalados en las sopandas secundarias y algunos de los instalados sobre las zapatas) se definen mediante un comportamiento elástico y lineal, con un módulo de elasticidad de 210GPa. El área equivalente de estos puntales se definirá posteriormente.

El comportamiento tenso-deformacional de los puntales con limitadores de carga se define a partir de los resultados obtenidos en las pruebas P1 y P2 realizadas a los limitadores de carga aislados antes de la ejecución del ensayo experimental (véase Fig. 5.5). A los resultados obtenidos se les suma el desplazamiento teórico de un puntal de 2.3m de altura. Los resultados obtenidos, en términos de carga-desplazamiento, se transforman en tensión-deformación como se representa en la Fig. 6.2. Para los modelos numéricos se define entonces un comportamiento del puntal con los limitadores de carga instalados idéntico al obtenido experimentalmente. En la Fig. 6.2 se muestra el comportamiento considerado en los modelos numéricos.

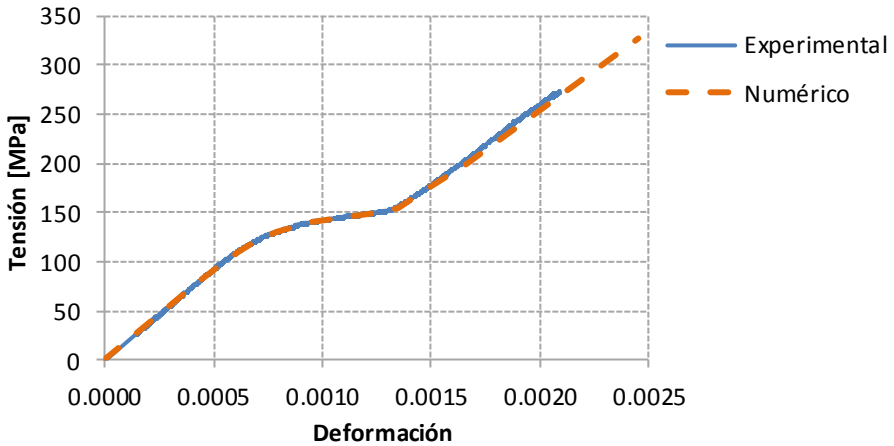


Fig. 6.2. Comportamiento tenso-deformacional definido en los modelos numéricos.

Además del comportamiento tenso-deformacional de los puntales, el modelo de elementos finitos requiere la definición del área de los puntales con la que poder evaluar la rigidez de dichos elementos. En este caso se ha utilizado el concepto de área equivalente de los puntales, que representa un valor del área de los puntales calculada mediante la rigidez experimental obtenida de cada uno de ellos. La rigidez de cada puntal se obtuvo con los resultados de las curvas fuerza-desplazamiento de cada puntal (véase Apéndice 1, apartado “A1.7. Curvas fuerza-desplazamiento de puntales”). El área equivalente obtenida es la que se introduce en los modelos numéricos. Este procedimiento solo se puede realizar para los puntales de las sopandas principales que son los que tienen dos pértigas anexas para la medida del desplazamiento promedio del puntal considerado. El área equivalente de los puntales de las sopandas secundarias y de los puntales sobre las zapatas se considera igual al promedio de las áreas equivalentes obtenidas. La Tabla 6.1 muestra los resultados obtenidos siguiendo esta metodología (A_{eq}) y el porcentaje que representa el área equivalente calculada respecto al área del cuerpo de los puntales (A_{eq}/A_{cuerpo}).

Tabla 6.1. Área equivalente de cada puntal utilizado en el ensayo experimental y porcentaje respecto al área del cuerpo del puntal.

Puntal	A_{eq} [cm ²]	A_{eq}/A_{cuerpo} [%]
P24 IL	0.91	31.38
P25 IL	0.67	23.18
P27 IL	0.52	18.16
P43 IL	1.03	35.62
P44 IL	0.61	21.21
P45 IL	0.65	22.61
P47 IL	0.79	27.46
P48 IL	1.02	35.33
P64 IL	0.92	31.86
P65 IL	0.89	30.67
P67 IL	0.83	28.68
Promedio	0.80	27.83

Como se ha comentado, el cálculo del área equivalente de cada puntal se ha realizado adoptando el desplazamiento promedio registrado en las pértigas anexas a cada puntal. Este desplazamiento no se mide en el punto exacto del puntal, sino que se mide en puntos cercanos situados a mitad camino entre dos puntales consecutivos. El desplazamiento vertical de estos puntos de la sopanda es siempre ligeramente superior a los desplazamientos de la sopanda en los puntos donde se coloca un puntal. Así, la rigidez del puntal será ligeramente superior a la calculada siguiendo esta metodología y, por tanto, el área equivalente también será ligeramente superior. El objetivo de este apartado de calibración del modelo numérico consiste en determinar qué factor de amplificación debe considerarse para el área equivalente para obtener un mejor ajuste entre las medidas experimentales y los resultados del modelo numérico.

Los diversos ensayos en puntales realizados y analizados en el Capítulo 4 revelaron que el área equivalente promedio obtenida fue del 47.56% del área del cuerpo, valor que resulta sustancialmente superior a las áreas equivalentes obtenidas en el ensayo. Sin embargo, esta rigidez medida experimentalmente fue registrada bajo condiciones ideales de ensayo, con una rótula en la parte inferior del puntal, y la posición de los captadores de desplazamiento en un punto por debajo de la base superior del puntal (véase Fig. 4.39). Consecuentemente, la rigidez obtenida de esta forma es superior a la real porque desprecia la elevada influencia que puede tener las bases de los puntales y las condiciones de apoyo de las mismas en una superficie plana.

Vistos estos dos extremos comentados (área equivalente calculada a partir del ensayo experimental y a partir de los ensayos realizados en el Capítulo 4), la rigidez real de los puntales se situará en un valor intermedio. Por ejemplo, el valor real del área

equivalente promedio se encontrará comprendido entre el 27.83% del área del cuerpo de un puntal y el 47.56%.

Se considera, como hipótesis razonable, que la modificación de la rigidez de los puntales debe ser idéntica. Así, se ha establecido un nuevo factor (F) que, multiplicando el área equivalente de cada puntal, provoque el mejor ajuste entre los resultados del modelo numérico y los resultados experimentales obtenidos. Este factor (F) tiene como límites inferior y superior los valores 1.00 y 1.71, que representan un área equivalente promedio del 27.83% y del 47.56% del área del cuerpo del puntal respectivamente.

El ajuste se ha evaluado para las cargas medias del sistema de apuntalamiento (S_{exp} [kN/m²]). Los valores obtenidos del ensayo experimental pueden consultarse en el Capítulo 5, Tabla 5.1. Las primeras pruebas de calibración se realizaron para valores del factor F de 1.10, 1.20, 1.30 y el valor máximo de 1.71. La Tabla 6.2 muestra los resultados obtenidos. Los parámetros evaluados para obtener la calidad del ajuste del modelo numérico han sido:

- Valor promedio y desviación estándar de los cocientes entre la carga media medida experimentalmente y la carga media obtenida de los modelos numéricos en cada una de las operaciones constructivas.
- Error total obtenido como la suma en valor absoluto de los errores cometidos en cada operación constructiva entre las cargas medias medidas experimentalmente y las cargas medias obtenidas de los modelos numéricos. Este parámetro se considera el más importante de los tres ya que, a valores similares de promedio y desviación estándar, un valor menor del error cometido minimiza las diferencias encontradas en valor absoluto entre la carga obtenida de los modelos y la carga medida experimentalmente.

Tabla 6.2. Calibración del modelo numérico en función del factor F (I). Cargas en puntales en kN/m².

Operación constructiva (i)	S_{exp}	F=1.10	F=1.20	F=1.30	F=1.71
		S_{MEF}	S_{MEF}	S_{MEF}	S_{MEF}
Hormigonado	4.43	4.39	4.39	4.39	4.40
Clareado	4.20	2.97	3.05	3.12	3.34
Carga arena	5.36	4.38	4.51	4.63	4.98
Carga agua	7.44	6.88	7.20	7.50	8.39
Descarga parcial agua	4.96	4.57	4.83	5.08	5.82
Carga agua	7.07	6.73	7.05	7.36	8.28
Descarga parcial agua	4.90	4.55	4.82	5.07	5.81
$S_{exp}(i) / S_{MEF}(i)$ – Promedio		1.13	1.09	1.05	0.96
$S_{exp}(i) / S_{MEF}(i)$ – Desviación estándar		0.14	0.14	0.14	0.15
$\sum_i S_{exp}(i) - S_{MEF}(i) $ – Error total		3.68	2.30	2.25	5.03

Según los resultados obtenidos se decidió ampliar el estudio de calibración del modelo numérico a valores del factor F entre 1.20 y 1.30, obteniendo valores del error total menores. Los valores considerados del factor F fueron 1.23, 1.24, 1.25 y 1.26. La Tabla 6.3 muestra los resultados obtenidos, demostrando que el modelo con un valor del factor F de 1.25 es el que muestra un mejor ajuste a las medidas experimentales.

Tabla 6.3. Calibración del modelo numérico en función del factor F (II). Cargas en puntales en kN/m².

Operación constructiva (i)	S _{exp}	F=1.23	F=1.24	F=1.25	F=1.26
		S _{MEF}	S _{MEF}	S _{MEF}	S _{MEF}
Hormigonado	4.43	4.39	4.39	4.39	4.39
Clareado	4.20	3.07	3.08	3.09	3.09
Carga arena	5.36	4.55	4.56	4.57	4.58
Carga agua	7.44	7.29	7.32	7.35	7.38
Descarga parcial agua	4.96	4.91	4.94	4.96	4.99
Carga agua	7.07	7.15	7.18	7.21	7.24
Descarga parcial agua	4.90	4.90	4.92	4.94	4.97
S _{exp} (i) / S _{MEF} (i) – Promedio		1.08	1.07	1.07	1.07
S _{exp} (i) / S _{MEF} (i) – Desviación estándar		0.14	0.14	0.14	0.14
Σ _i [S _{exp} (i) - S _{MEF} (i)] – Error total		2.04	2.01	1.99	2.02

6.2.2. Comprobación del modelo numérico

La calibración del modelo numérico ha minimizado y ajustado al máximo las diferencias entre las medidas experimental y los resultados del modelo de elementos finitos en términos de transmisión de cargas medias entre la losa y los puntales. La comprobación del modelo de elementos finitos consistió en comprobar si la metodología seguida conseguía obtener un buen ajuste para las cargas de cada puntal y para los desplazamientos de cada pértiga, comparando los resultados medidos experimentalmente y los resultados obtenidos del modelo calibrado.

Así, la Fig. 6.3 muestra la comparación de la carga del puntal con limitador de carga (LL) más cargado entre los resultados experimentales (P43·IL) y los resultados numéricos (MEF-LL) durante el ensayo experimental. Puede observarse como la respuesta del modelo numérico es casi idéntica a las medidas experimental, validándose, por tanto, la metodología adoptada para la calibración del modelo numérico. La comparación de la carga de todos los puntales entre la medida experimentalmente y la obtenida con el modelo numérico se puede consultar en el Apéndice 2, apartado “A2.2. Comprobación del modelo numérico”.

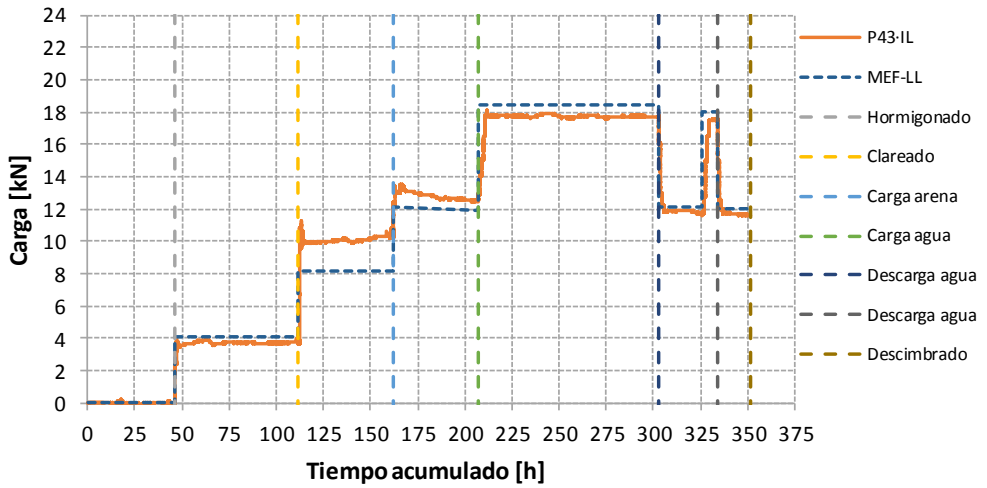


Fig. 6.3. Validación del modelo numérico. Comparación de las cargas obtenidas experimentalmente durante el ensayo (P43-IL) con los resultados del modelo de elementos finitos (MEF-LL) para un puntal (P43) con limitador de carga (LL).

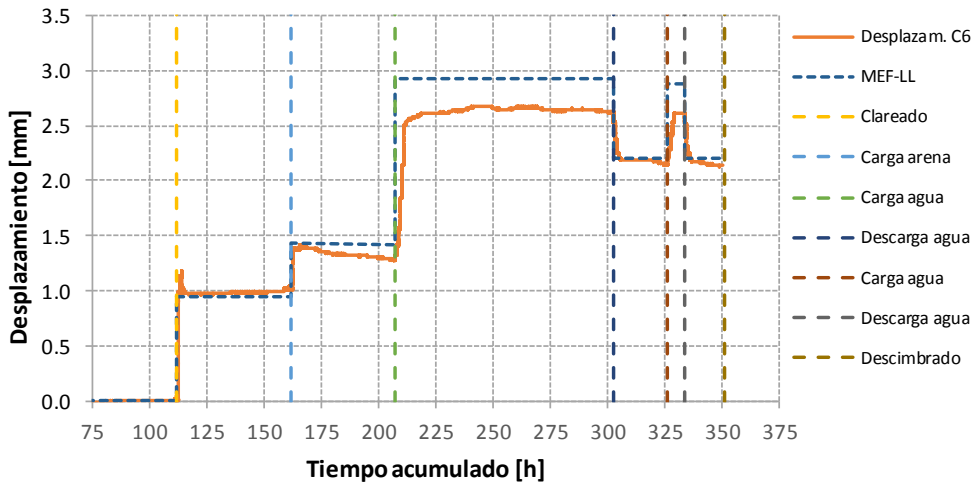


Fig. 6.4. Validación del modelo numérico. Comparación de los desplazamientos obtenidos experimentalmente durante el ensayo (C6) con los resultados del modelo de elementos finitos (MEF-LL) para una pértiga anexa al puntal más cargado.

La Fig. 6.4, por su parte, muestra la comparación del desplazamiento de una pértiga (C6) anexa al puntal más cargado entre los resultados experimentales (Desplazam. C6) y los resultados numéricos (MEF-LL) durante el ensayo experimental. Se han representado los desplazamientos tomando como referencia el desplazamiento tras el hormigonado. Según se ha comentado en el Capítulo 5, apartado “5.4.3. Flechas en forjados”, tras el hormigonado tuvo que rectificarse la posición de las pértigas.

La comparación aquí realizada evita esta rectificación, considerando como desplazamiento nulo el desplazamiento registrado tras el hormigonado y comparando consecuentemente los incrementos de desplazamiento causados a partir del clareado de la losa. Puede observarse como la respuesta del modelo numérico es casi idéntica a las medidas experimentales, validándose, por tanto, la metodología adoptada para la calibración del modelo numérico. La comparación de los desplazamientos de cada una de las pértigas entre la medida experimental y la obtenida con el modelo numérico se puede consultar en el Apéndice 2, apartado “A2.2. Comprobación del modelo numérico”.

El modelo numérico, calibrado y comprobado en este apartado, fue utilizado para los análisis mediante simulación numérica realizados en el apartado “6.3. Efecto positivo del limitador de carga en el ensayo” y en el apartado “6.4. Efecto positivo del limitador de carga durante el descimbrado”.

6.3. Efecto positivo del limitador de carga en el ensayo

Durante el ensayo se pudo observar (véase Capítulo 5) un comportamiento adecuado de los limitadores de carga en puntales, manteniendo la carga de los mismos en niveles reducidos al activarse la plastificación de este nuevo dispositivo desarrollado. Sin embargo, los resultados mostrados en el Capítulo 5 carecen de una comparación con lo que hubiera pasado en una situación hipotética sin limitadores de carga instalados en puntales. El objetivo de este apartado consiste en evaluar qué hubiera pasado en el ensayo experimental si no se hubieran instalado limitadores de carga, aprovechando el modelo numérico calibrado y validado anteriormente. La comparación entre la situación con limitadores de carga (modelo calibrado y validado) y la situación sin limitadores de carga se evalúa comparando ambos resultados para las cargas medias y máximas del sistema de apuntalamiento, las cargas en cada puntal, y los desplazamientos registrados en las posiciones en las que aparece una pértiga instalada en el ensayo experimental.

6.3.1. Cargas medias y cargas máximas

Las cargas medias y máximas obtenidas mediante simulación numérica en puntales con limitadores de carga (S_{MEF-LL}) y sin limitadores de carga (S_{MEF}) se muestran en la Tabla 6.4. Se puede observar como las cargas medias y las cargas máximas registradas en el sistema de apuntalamiento son siempre inferiores en cada operación constructiva cuando se utilizan limitadores de carga en puntales. La carga máxima se mantuvo en 18.4kN (17.7kN experimentalmente) cuando se utilizaron limitadores de carga de 16.0kN de carga límite. En cambio, en el caso de no haber utilizado limitadores de carga, la carga máxima recibida en el sistema de apuntalamiento hubiera alcanzado un valor de 22.1kN, significativamente superior que la carga máxima finalmente recibida. La reducción de carga introducida por los limitadores de carga es del 17%, que podría haber sido incluso superior si se hubieran utilizado

limitadores de carga con una carga límite inferior. De hecho, en el Capítulo 3 aparecen situaciones en las que la carga máxima fue reducida en más de un 30% sin producir consecuencias negativas.

Tabla 6.4. Cargas medias y cargas máximas obtenidas mediante simulación numérica en puntales con limitadores de carga (MEF-LL) y sin limitadores de carga (MEF).

Operación constructiva	Cargas medias [kN/m ²]		Cargas máximas [kN]	
	S _{MEF-LL}	S _{MEF}	S _{MEF-LL}	S _{MEF}
Hormigonado	4.39	4.39	5.05	5.04
Clareado	3.09	3.16	8.41	8.70
Carga arena	4.57	4.72	12.38	12.98
Carga agua	7.35	8.04	18.44	22.12
Descarga parcial agua	4.96	5.62	12.08	15.45
Carga agua	7.21	7.93	18.02	21.80
Descarga parcial agua	4.94	5.61	12.03	15.42

6.3.2. Cargas en cada puntal

La comparación a nivel de las cargas obtenidas en cada puntal durante el proceso constructivo entre el modelo numérico con limitadores de carga (calibrado y validado) y el modelo sin limitadores de carga es otro indicador adecuado para evaluar el efecto de los limitadores de carga. En la Fig. 6.5 se muestra dicha comparación para el puntal 43 (MEF-P43-LL y MEF-P43 respectivamente) que fue el que registró una mayor carga durante el ensayo experimental. Puede observarse como la carga en ambas situaciones, con y sin limitadores de carga, es totalmente idéntica hasta alcanzar situaciones en las que se intenta superar la carga límite de diseño de los limitadores de carga (carga de agua). En este momento es cuando la plastificación del limitador de carga entra en juego, limita la carga que el puntal recibe, y redistribuye la carga sobrante, a través del forjado, hacia los puntales vecinos. Por esta razón, la carga máxima de dicho puntal sin limitadores de carga hubiera sido de unos 22.0kN, mientras que con el uso de limitadores de carga de 16.0kN fue de 18.4kN. Una vez realizada la redistribución de carga hacia los puntales vecinos, a través de la losa o forjado, las situaciones de descarga-carga para los casos con y sin limitadores de carga siguen caminos diferentes ya que la distribución de cargas en el sistema de apuntalamiento es totalmente distinta.

Los resultados obtenidos para cada uno de los puntales se presentan en el Apéndice 2, apartado “A2.3. Resultados del estudio del efecto positivo del limitador de carga en el ensayo”. De los resultados obtenidos se puede concluir que los puntales menos cargados, con cargas inferiores a la carga límite, presentan generalmente cargas idénticas para los casos con y sin limitadores de carga. Sin embargo, existen algunos puntales con cargas inferiores a la carga límite que presentan mayor carga con limitadores de carga que sin limitadores de carga. Esto ocurre porque los limitadores

de carga han entrado en comportamiento plástico en otro punto del sistema de apuntalamiento, redistribuyendo la carga sobrante y aumentando la carga de los puntales vecinos. Cualquier puntal con cargas superiores a la carga límite de los limitadores de carga presenta una carga inferior para el caso con limitadores de carga respecto al caso sin limitadores de carga. Este efecto es un efecto directo del concepto de limitador de carga en puntales.

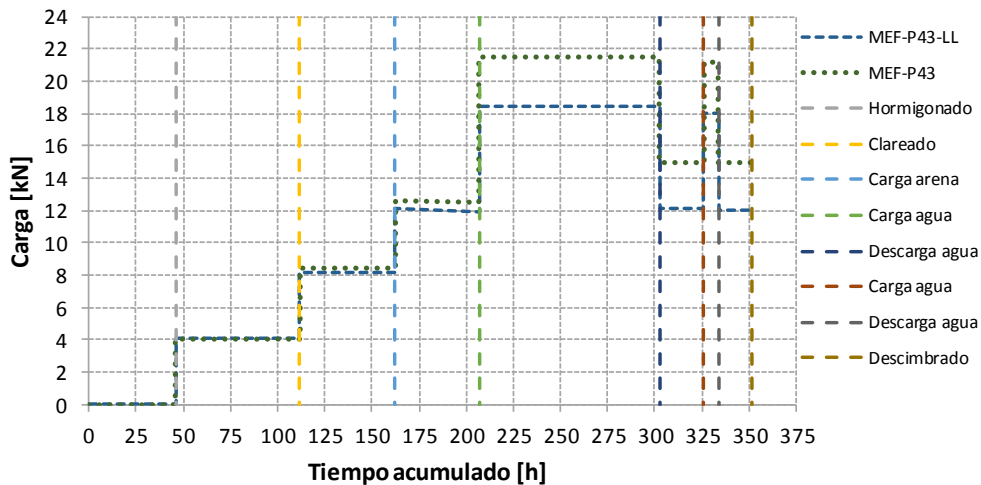


Fig. 6.5. Comparación de las cargas obtenidas numéricamente para el puntal 43 utilizando limitadores de carga en puntales (MEF-P43-LL) y sin el uso de limitadores de carga (MEF-P43).

6.3.3. Desplazamiento en las posiciones donde aparece una pértiga instalada en el ensayo

Otro indicador adecuado para comparar la situación con y sin limitadores de carga en puntales es el desplazamiento registrado en los modelos numéricos en las posiciones donde aparece una pértiga instalada en el ensayo experimental, ya que estos son los puntos donde se ha validado el modelo numérico. La Fig. 6.6 muestra la comparación del desplazamiento en el punto que coincide con la posición de la pértiga C6 para el caso con limitadores de carga (MEF-C6-LL) y sin limitadores (MEF-C6). Puede observarse como el desplazamiento en ambas situaciones, con y sin limitadores de carga, es totalmente idéntico hasta alcanzar situaciones en las que se intenta superar la carga límite de diseño de los limitadores de carga (carga de agua). En este momento es cuando la plastificación del limitador de carga entra en juego, limita la carga que el puntal recibe, y redistribuye la carga sobrante, a través del forjado, hacia los puntales vecinos. Esta redistribución provoca que la carga sobrante se reparta entre diferentes elementos. Una parte de la carga redistribuida viaja hacia los puntales vecinos, mientras que el resto de la carga la asume el forjado, aumentando ligeramente la carga que recibe. Por esta razón, el desplazamiento

máximo de la losa o forjado con limitadores de carga es superior respecto a la situación sin limitadores de carga. A partir del momento en el que los limitadores de carga entran en acción (con comportamiento plástico), los forjados asumen una carga ligeramente superior y los desplazamientos a partir de dicho momento son generalmente superiores.

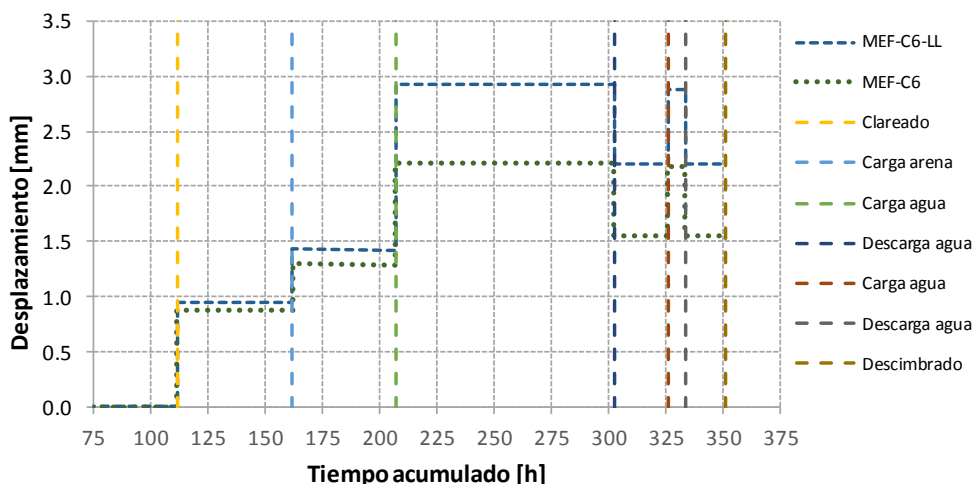


Fig. 6.6. Comparación de los desplazamientos de la losa obtenidos numéricamente en la posición de la pértiga C6 utilizando limitadores de carga en puntales (MEF-C6-LL) y sin el uso de limitadores de carga (MEF-C6).

Los desplazamientos obtenidos para cada uno de los puntos donde se sitúa una pértiga en el ensayo experimental se presentan en el Apéndice 2, apartado “A2.3. Resultados del estudio del efecto positivo del limitador de carga en el ensayo”. En todos los casos, tras la plastificación y actuación de los limitadores de carga, el desplazamiento de todos los puntos bajo la losa aumenta ligeramente respecto a la situación sin limitadores de carga. Este aumento del desplazamiento se debe a que parte de la carga redistribuida en cada puntal donde los limitadores de carga empiezan su comportamiento plástico la asume el forjado. Este hecho no supone en ningún momento un efecto negativo para los forjados, porque el ligero aumento de la carga que estos deben asumir se realiza en operaciones constructivas en las que el sistema de apuntalamiento está más solicitado, y consecuentemente los forjados lo están menos. En estas situaciones, en las que los forjados tienen capacidad resistente suficiente como para resistir cargas superiores, es en las que el limitador de carga rebaja las exigencias del sistema de apuntalamiento para aprovechar en mayor medida la resistencia de los forjados. Todo ello controlando exhaustivamente la carga que reciben los forjados sin llegar a producir fisuración en los mismos.

En otras operaciones constructivas los forjados están mucho más solicitados, recibiendo cargas cercanas a sus cargas de diseño. Generalmente, las situaciones más

desfavorables para los forjados se presentan en aquellos que no están apuntalados y tienen en la parte superior tantas plantas apuntaladas como juegos de cimbras se utilizan durante el proceso constructivo. En estas situaciones, tal y como se ha demostrado en el Capítulo 3 y en los estudios relacionados [45,106], el limitador de carga no introduce ninguna modificación de la carga de los forjados ya que estos elementos no disponen en estas fases constructivas de capacidad resistente sobrante.

6.4. Efecto positivo del limitador de carga durante el descimbrado

Durante el ensayo (véase Capítulo 5) se realizó la operación de descimbrado de la losa de forma inversa a las recomendaciones prácticas. Estas recomendaciones establecen que para no producir sobrecargas inesperadas en los puntales que puedan producir su rotura, el descimbrado de puntales debe realizarse desde aquellos puntales situados en centro de vano hasta los puntales más próximos a los pilares. Es decir, en primer lugar deberán descimbrarse los puntales más cargados para finalmente descimbrar aquellos que reciben menos carga.

Sin embargo, durante las operaciones de descimbrado, y sobre todo en aquellos casos de plantas con muchos vanos, los operarios retiran los puntales de una forma más o menos arbitraria. En algunos casos, la secuencia de retirada de los puntales es totalmente opuesta a la recomendada, produciendo sobrecargas en puntales que pueden alcanzar su punto de rotura.

El limitador de carga en puntales evita las sobrecargas en los mismos, acotando la máxima carga que recibe un puntal por debajo de la carga límite de los limitadores. De hecho, en el Capítulo 5, se ha demostrado su correcto funcionamiento experimental en la limitación de la sobrecarga que los puntales reciben durante el descimbrado. En la Fig. 6.7 se muestra la secuencia de descimbrado seguida en el ensayo, retirando los puntales desde los próximos a los pilares hasta el del centro de vano (puntal 45). La retirada de los puntales se realizó de forma concéntrica al centro de vano, retirando los puntales según la secuencia indicada, desde la circunferencia C1 hasta la C4. Finalmente se retiraron los puntales vecinos al puntal de centro de vano (puntales identificados en la secuencia de descimbrado como el nº 16 y el nº 17).

El objetivo de este apartado consiste en analizar qué hubiera ocurrido durante el descimbrado de la losa del ensayo experimental si no se hubieran instalado limitadores de carga. Este análisis requerirá del empleo del modelo calibrado y validado anteriormente (véase apartado “6.2. Calibración y comprobación del modelo numérico”) y se realizará para dos situaciones distintas:

- Manteniendo las condiciones del ensayo experimental, en las que cada puntal presenta una rigidez distinta.

- Considerando, como situación ideal, que la rigidez de todos los puntales empleados es la misma, e igual a la rigidez evaluada experimentalmente en el Capítulo 4, con un área equivalente igual al 47.56% del área del cuerpo del puntal.

Previamente a los análisis propuestos se analizará la validez del modelo calibrado anteriormente para la predicción de las cargas de los puntales durante el descimbrado de la losa.

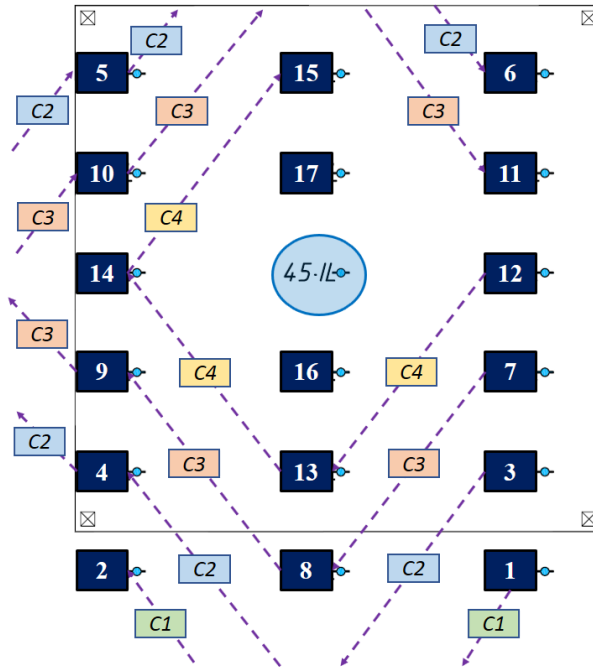


Fig. 6.7. Secuencia de descimbrado de forma inversa a las recomendaciones establecidas como buenas prácticas.

6.4.1. Comprobación del modelo numérico durante el descimbrado

La comprobación del modelo numérico calibrado anteriormente se realizó comparando las cargas en los puntales registradas experimentalmente durante el descimbrado con las obtenidas del modelo numérico. En el modelo numérico se añadieron tantos pasos de carga como puntales quedaban instalados en el ensayo experimental (18 puntales). En cada uno de los pasos de carga se definió la retirada de un nuevo puntal y se evaluaba la carga de los puntales que quedaban instalados. La comparación de la carga registrada experimentalmente y la obtenida en los modelos numéricos, para cada uno de los puntales se presenta en el Apéndice 2, apartado “A2.4.1. Comprobación del modelo numérico durante el descimbrado”. A continuación, en la Fig. 6.8 se muestra la comparación obtenida para el puntal de

centro de vano (P45) entre las cargas registradas experimentalmente (P45-Exp) y las obtenidas del modelo numérico con limitadores de carga (P45-LL). Cada una de las líneas verticales marcadas con un número en la parte superior indica el momento de retirada del puntal según la secuencia de descimbrado definida en la Fig. 6.7.

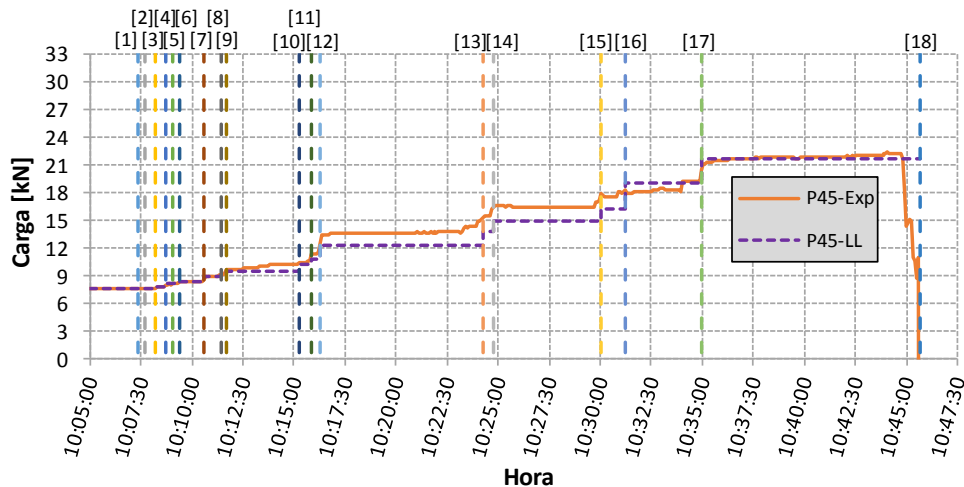


Fig. 6.8. Comparación de cargas del puntal 45 durante el descimbrado entre las medidas experimentalmente (P45-Exp) y las obtenidas del modelo numérico con limitadores de carga (P45-LL).

Como se puede observar en la Fig. 6.8 para la comparación entre las cargas medidas experimentalmente y las obtenidas del modelo numérico del puntal 45, así como también las comparaciones realizadas para el resto de puntales, el modelo numérico es capaz de evaluar con elevada precisión las cargas de los puntales durante la operación de descimbrado del ensayo experimental. Cabe recordar como la carga del puntal situado en el centro de vano presentaba un valor de 7.6kN al inicio del descimbrado, alcanzando un valor de 21.4kN al final del descimbrado, teniendo en cuenta que se utilizaron limitadores de carga en los puntales. El modelo queda, por tanto, validado para la realización de los análisis presentados en los siguientes sub-apartados.

6.4.2. Comparación de la fase de descimbrado con y sin limitadores de carga según las mismas condiciones del ensayo

En este sub-apartado se evalúa qué hubiera ocurrido en el desarrollo de la operación de descimbrado de la losa del ensayo si no se hubieran instalado limitadores de carga en los puntales. Para este análisis se han mantenido las condiciones del modelo calibrado y validado anteriormente, en las que cada puntal presenta la rigidez real medida durante el ensayo experimental y los mismos limitadores de carga utilizados.

Por lo tanto, el análisis aquí realizado presenta las mismas condiciones que el ensayo experimental.

En la Fig. 6.9 se presentan los resultados obtenidos para el puntal 45 con limitadores de carga instalados en puntales (P45-LL) y sin limitadores de carga (P45). Los resultados para el resto de puntales se presentan en el Apéndice 2, apartado “A2.4.2. Comparación de la fase de descimbrado con y sin limitadores de carga según las mismas condiciones del ensayo”.

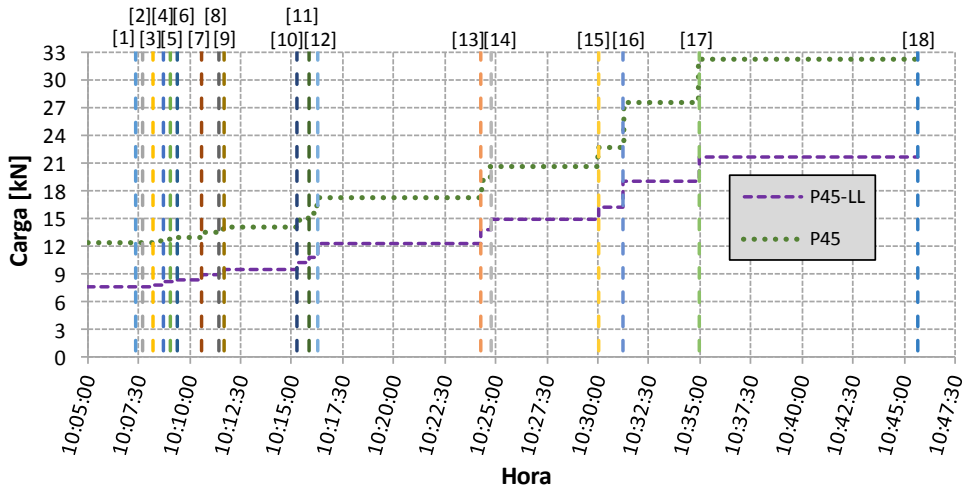


Fig. 6.9. Comparación de cargas del puntal 45 durante el descimbrado con limitadores de carga en puntales (P45-LL) y sin limitadores de carga (P45).

En la Fig. 6.9 se observa cómo la carga del puntal 45, cuando se utilizan limitadores de carga (P45-LL), es notablemente inferior al inicio de la operación de descimbrado. Para encontrar una explicación a este fenómeno hay que recurrir a las cargas que recibió este puntal anteriormente, durante el ensayo experimental. El puntal 45, debido al uso de limitadores de carga en el sistema de apuntalamiento, recibió un nivel de carga inferior del que realmente hubiera recibido sin limitadores de carga (véase la carga del puntal 45 en el Apéndice 2, apartado “A2.3. Resultados del estudio del efecto positivo del limitador de carga en el ensayo”). Por esta razón, el nivel de carga al inicio del descimbrado es considerablemente inferior.

A partir del inicio de la operación de descimbrado con la secuencia indicada, los saltos de carga observados durante la retirada de cada puntal son idénticos. Esto ocurre hasta que la carga del puntal 45, cuando se utilizan limitadores de carga (P45-LL), alcanza valores cercanos a la carga límite de 16.0kN. En este punto puede observarse como los incrementos de carga registrados en la retirada del quinceavo, dieciseisavo y diecisieteavo puntal son significativamente inferiores cuando se utilizan limitadores de carga en puntales. Finalmente, con el uso de limitadores de carga, la carga del puntal 45 se mantuvo por debajo de los 21.6kN, mientras que, si

no se hubieran instalado limitadores de carga, la carga hubiera alcanzado un valor de 32.2kN. La reducción de la carga máxima durante el descimbrado, debido al uso de limitadores de carga, fue del 32.9%.

6.4.3. Comparación de la fase de descimbrado con y sin limitadores de carga considerando puntales de igual rigidez

En el anterior apartado se ha analizado qué hubiera ocurrido durante el descimbrado de la losa del ensayo si no se hubieran instalado limitadores de carga en puntales. Este estudio se ha realizado para condiciones muy concretas del ensayo, en las que influye significativamente la rigidez, medida experimentalmente, de cada uno de los puntales instalados. La sección o área equivalente promedio de los puntales utilizados resultante de la calibración del modelo numérico resultó igual al 34.79% de la sección o área del cuerpo del puntal, registrando la carga máxima en un puntal no situado en el centro de vano (puntal 43).

El objetivo de este apartado es generalizar el estudio realizado y caracterizar qué podría llegar a ocurrir. Para ello deben considerarse las condiciones realistas más desfavorables posibles y con ello establecer una cota superior de las sobrecargas que podrían haber recibido los puntales del ensayo experimental durante el descimbrado. Una situación mucho más desfavorable que la finalmente ocurrida en el ensayo experimental presentaría las siguientes características:

- **Puntales de igual rigidez.** Si los puntales presentan la misma rigidez, la carga máxima se registrará en el centro de vano, justo en el último puntal retirado durante el descimbrado. Supone, por tanto, unas condiciones más desfavorables para la secuencia de descimbrado seguida y es una situación totalmente factible.
- **Mayor rigidez de los puntales.** Se ha establecido como cota superior de la rigidez de los puntales la evaluada en el Capítulo 4 bajo unas condiciones de ensayo establecidas por la normativa de referencia [126]. En estos ensayos se aplicó una rótula en el extremo de un puntal y se midió, por tanto, la rigidez de los puntales sin la influencia de grandes excentricidades de la carga. La rigidez promedio de los puntales utilizados bajo estas condiciones de ensayo, representada por el valor del área equivalente, fue del 47.56% de la rigidez o área del cuerpo del puntal.

Evidentemente existen otras muchas situaciones más desfavorables, aunque con una probabilidad de ocurrencia muy reducida. Así, esta situación se puede considerar como la situación posible más desfavorable.

El análisis se ha realizado utilizando los mismos limitadores de carga del ensayo, con una altura del hueco de 2mm, y con limitadores de carga similares, de la misma carga límite (16.0kN), pero con una altura del hueco de 4mm.

6.4.3.1. Limitadores de carga utilizados en el ensayo

En el Apéndice 2, apartado “A2.4.3. Comparación de la fase de descimbrado con y sin limitadores de carga considerando puntales de igual rigidez” se presentan los resultados obtenidos para cada puntal durante el descimbrado. Los gráficos muestran la carga de cada puntal cuando no se utilizan limitadores de carga (PXX) y con limitadores de carga (PXX-LL) durante la secuencia de descimbrado. Esta secuencia de descimbrado se ha representado mediante los puntales retirados desde el 1 (P70) hasta el 18 (P45) definidos en la Fig. 6.7.

A modo de ejemplo, en la Fig. 6.10 se presentan los resultados para el puntal 45. Puede observarse como la carga del puntal 45 alcanzaría un valor de 32.6kN cuando se utilizan limitadores de carga en puntales. Cabe recordar que se estaban utilizando limitadores de carga de 16.0kN. Consecuentemente, el valor de carga alcanzado claramente hubiera agotado el máximo desplazamiento plástico permitido del limitador de carga. Por lo tanto, la carga del puntal a partir de la retirada del dieciseisavo puntal habría aumentado considerablemente.

Incluso así, el valor de carga alcanzado es un valor significativamente inferior al que se hubiera obtenido de no haber utilizado limitadores de carga en puntales. En este caso se habrían alcanzado cargas en el puntal 45 de un valor de 46.8kN. En este caso, los limitadores de carga hubieran reducido el nivel de carga máximo en un 30.3%. Ante estos elevados niveles de carga registrados se podría producir la rotura de varios puntales.

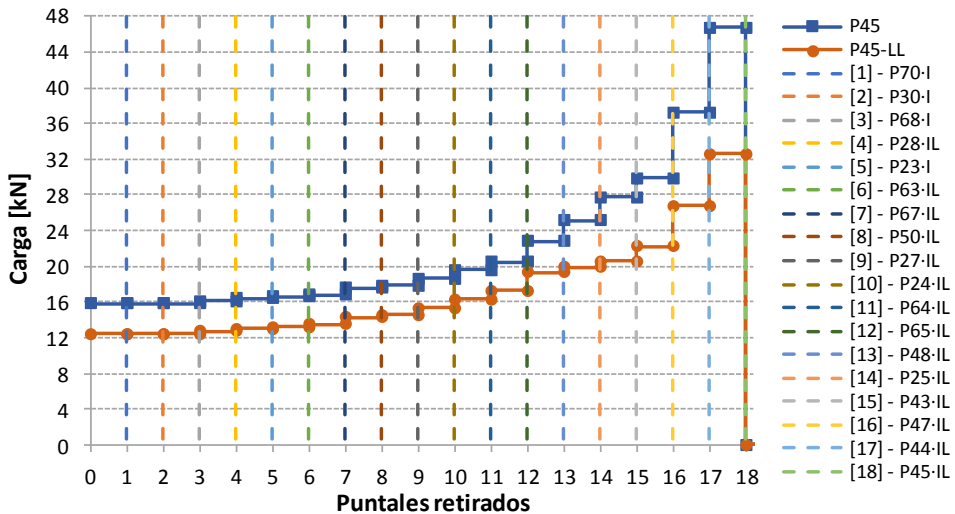


Fig. 6.10. Comparación de cargas del puntal 45 durante el descimbrado con limitadores de carga en puntales (P45-LL) y sin limitadores de carga (P45).

6.4.3.2. Limitadores de carga con la misma carga límite y superior máximo desplazamiento plástico permitido

A raíz de los resultados obtenidos previamente se plantea en este sub-apartado el estudio de la operación de descimbrado con un limitador de carga con la misma carga límite (16kN) pero con una altura del hueco superior, de valor igual a 4mm. Esta altura aseguraría que los limitadores de carga no agoten el máximo desplazamiento plástico permitido. Los resultados hasta el descimbrado serían totalmente idénticos, puesto que en ningún momento se alcanzó el agotamiento del máximo desplazamiento plástico permitido.

El comportamiento introducido en el modelo numérico del limitador de carga con más hueco se representa en la Fig. 6.11. Respecto a los comportamientos experimental y numérico definido con anterioridad, el nuevo comportamiento se diferencia en no tener una limitación del máximo desplazamiento plástico permitido. Posteriormente al análisis de resultados, se pudo conocer que sería suficiente considerar una altura del hueco de 4mm para que no se produzca el agotamiento del máximo desplazamiento plástico permitido.

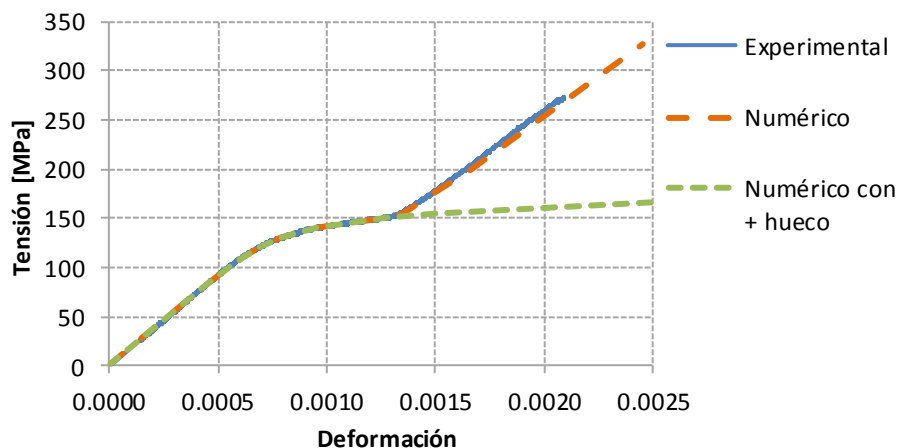


Fig. 6.11. Comportamiento tenso-deformacional definido en los modelos numéricos con limitadores de carga con más hueco.

En el Apéndice 2, apartado “A2.4.3. Comparación de la fase de descimbrado con y sin limitadores de carga considerando puntales de igual rigidez” se presentan los resultados obtenidos para cada puntal durante el descimbrado. A modo de ejemplo, en la Fig. 6.12 se presentan los resultados para el puntal 45 (último en ser descimbrado). Pueden observarse los resultados obtenidos con anterioridad para el caso en el que no se utilizan limitadores de carga en puntales (P45) y cuando se utilizan limitadores de carga con una altura del hueco de 2mm (P45-LL), alcanzando valores máximos de la carga de 46.8kN y 32.6kN respectivamente.

Si se introdujeran los limitadores de carga con mayor altura del hueco (P45-LL+), la máxima carga del puntal 45 alcanzaría un valor de 22.2kN, claramente inferior al valor de carga registrado en los anteriores casos. Con una altura del hueco de 4mm, el máximo desplazamiento plástico del limitador de carga no se hubiera agotado, y el limitador de carga durante el descimbrado hubiera cumplido su función perfectamente, manteniendo la carga de los puntales en un nivel reducido y evitando la rotura de los mismos. La reducción de la carga en este caso es muy notable. Respecto a la no utilización de limitadores de carga, la reducción de la carga máxima es de un 53%.

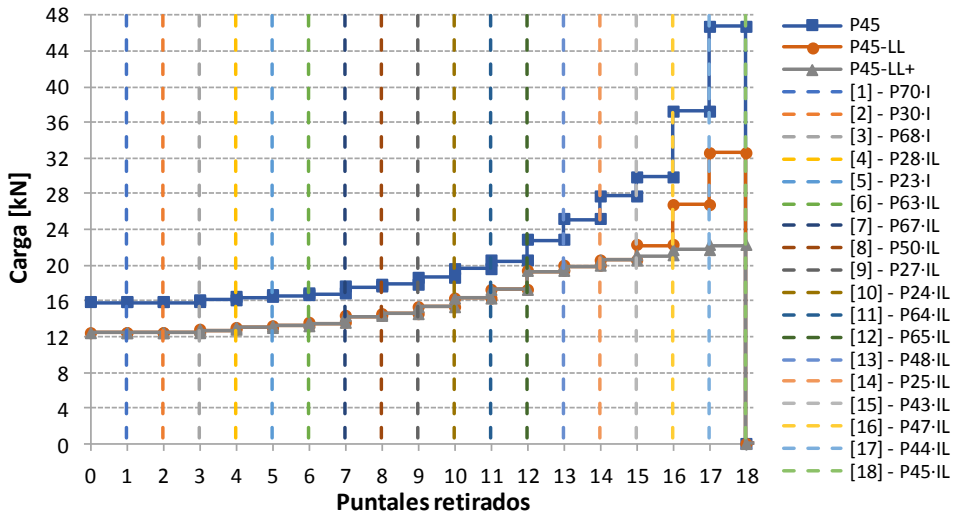


Fig. 6.12. Comparación de cargas del puntal 45 durante el descimbrado con limitadores de carga con huecos de 2mm (P45-LL), huecos de 4mm (P45-LL+) y sin limitadores de carga (P45).

6.5. Efecto positivo del limitador de carga frente al colapso progresivo de las estructuras de edificios durante su construcción

6.5.1. Breve introducción

Son diversas las publicaciones que han analizado fallos durante la construcción de estructuras de edificios [1,9,12,18,129,130]. Las causas de estos fallos recaen tanto en la cimbra como en la estructura del edificio. Por un lado, los fallos de la cimbra son debidos a: cargas en puntales superiores a la carga admisible, deficiente instalación de los puntales, y pobre o inexistente sistema de arriostramiento entre puntales [12]. Por otro lado, los fallos en la estructura del edificio se deben a un diseño deficiente: insuficiente longitud de anclaje de las armaduras, insuficiente armado frente a punzonamiento o errores en la disposición del armado [12]. Es de

destacar aquí que un fallo local en la estructura del edificio o en la cimbra puede provocar un colapso progresivo de todo el edificio durante su construcción [13,131].

A día de hoy, el colapso progresivo de estructuras de edificios en fase de servicio está siendo ampliamente estudiado por la comunidad científica [131–142], y también es tratado por un amplio abanico de normas internacionales [128,143,144]. Resulta especialmente importante estudiar el colapso progresivo porque, aunque su probabilidad de ocurrencia es muy baja, puede dar lugar a importantes pérdidas materiales, económicas y humanas. De forma simplificada, el estudio del colapso progresivo en un edificio analiza el comportamiento de la estructura tras el fallo repentino de una o varias columnas. Este escenario accidental se considera actualmente como un escenario representativo para poder diseñar estructuras robustas frente a eventos extremos [133,143–146]. Existen una serie de recomendaciones prácticas que permiten abordar la robustez en el diseño de estructuras de una forma simplificada. Con esta forma simplificada de abordar el problema se descartan las aproximaciones más complejas, como son el análisis de la retirada de una columna mediante simulación numérica en análisis dinámicos o la realización de ensayos experimentales. Estas recomendaciones prácticas, que aparecen en las normativas de referencia [143,144], establecen un factor de amplificación dinámica (DAF por sus siglas en inglés). Este DAF multiplica el valor de las cargas y permite considerar, de forma indirecta, el efecto dinámico en un cálculo estático. No obstante, muchos autores [133,146–148] han manifestado que, en una gran mayoría de los casos, los DAF propuestos por las normas y recomendaciones actuales son exagerados y quedan muy del lado de la seguridad.

A diferencia de los avances realizados en el campo del colapso progresivo de estructuras de edificios durante la fase de servicio, todavía no se ha estudiado ni se han establecido recomendaciones prácticas para considerar y evitar el colapso progresivo de estructuras en fase de construcción. Tan solo alguna normativa, de forma aislada, empieza a tratar el colapso progresivo durante la construcción de una forma muy superficial [149]. Como se ha visto anteriormente, en la fase de construcción existe una íntima interacción entre el comportamiento de la estructura y la cimbra. Cualquier fallo local de la estructura o de la cimbra puede ocasionar un colapso en cadena del sistema de apuntalamiento o incluso de todo el edificio. Adicionalmente, la cimbra es una estructura temporal, mucho menos robusta que la estructura del edificio, y cuya probabilidad de fallo es superior. De hecho, ocurren un elevado número de colapsos progresivos en estructuras de edificios durante su construcción, que conllevan multitud de fallecidos, heridos y grandes pérdidas económicas y materiales [12]. A diferencia de la baja probabilidad de que exista un colapso progresivo en la fase de servicio de un edificio, la probabilidad de fallo durante su construcción se podría catalogar como media.

Resulta de interés, por tanto, iniciar el estudio y establecer las primeras recomendaciones prácticas para evitar el colapso progresivo de estructuras de

edificios durante su construcción. Un primer estudio del colapso progresivo de estructuras durante la construcción se puede consultar en detalle en una de las publicaciones del autor de la tesis [13]. En este estudio, tras encontrar diferentes escenarios que podrían ocasionar el colapso progresivo del sistema de apuntalamiento, se propusieron medidas preventivas para evitar este tipo de riesgo durante la construcción de estructuras de edificios. Una de las medidas propuestas fue la del uso de limitadores de carga en los puntales.

El objetivo de este apartado consiste en estudiar y evaluar detalladamente el papel de los limitadores de carga frente al colapso progresivo del sistema de apuntalamiento y la estructura completa. Este estudio detallado se realizará mediante modelos numéricos avanzados y para los casos estudiados previamente [13] que produjeron graves consecuencias.

El apartado se organiza como se indica a continuación. En primer lugar se realiza un resumen del estudio realizado previamente por el autor [13]. En este resumen se aporta la información necesaria para entender el estudio con los limitadores de carga llevado a cabo en el marco de esta tesis doctoral. Se realiza una descripción de la estructura de un edificio considerado para el estudio y una descripción del modelo de elementos finitos desarrollado. También se aporta una descripción de los escenarios de fallo considerados y los primeros resultados. En segundo lugar, se analiza detalladamente los resultados de los escenarios de fallo más agresivos, sin y con el uso de limitadores de carga en puntales.

6.5.2. Resumen del estudio realizado previamente

6.5.2.1. Descripción de la estructura del edificio considerado para el estudio

El estudio se centró en una estructura de un edificio de hormigón armado de tres plantas en las que se utilizó una cimbra durante la construcción. En este sub-apartado se describen tanto la estructura permanente de hormigón armado como la estructura temporal o cimbra del edificio durante la construcción.

En la Fig. 6.13 se puede observar la geometría del edificio considerado (izquierda) y el esquema del sistema de apuntalamiento utilizado para cada una de las plantas (derecha).

La estructura considerada se corresponde con un edificio real de oficinas cuyas características geométricas y mecánicas están ampliamente descritas en CS [150]. La estructura permanente del edificio fue diseñada de acuerdo a las directrices marcadas por el EC-2 [128]. El edificio tiene tres plantas con forjados de losa maciza de 30cm de canto, con 3.5m de altura entre plantas y con pilares cuadrados de 40cm de lado distribuidos en planta de forma irregular. La descripción detallada del

edificio, que también fue objeto de otros estudios, se puede encontrar en Olmati et al. [133]. La Fig. 6.13 muestra una vista en 3D del edificio.

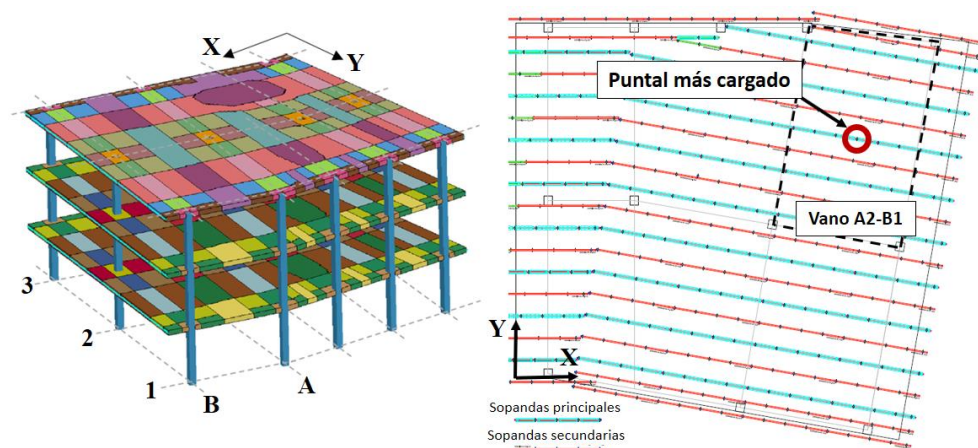


Fig. 6.13. Geometría de la estructura del edificio considerado y esquema del sistema de apuntalamiento.

La correcta consideración de la magnitud de las acciones (permanentes y sobrecargas) es un aspecto crucial para llevar a cabo un diseño apropiado del sistema de apuntalamiento [151]. El EC-1 [34] fue considerado en este trabajo para la definición de las sobrecargas durante la construcción. Las cargas permanentes (peso de la estructura y de la cimbra) fueron consideradas automáticamente en función de la densidad del material de cada componente. A los valores característicos de las acciones se les aplicó la combinación de cargas persistente o transitoria con coeficientes de 1.35 y 1.50 para cargas permanentes y sobrecargas respectivamente [152].

Para la determinación de la transmisión de cargas entre forjados y puntales, con el objetivo de diseñar un sistema de apuntalamiento adecuado para el edificio considerado, se utilizó el método simplificado de Calderón et al. [6] con las mejoras introducidas por Buitrago et al. [7,8]. Como se ha comentado en el Capítulo 2, este método simplificado ofrece mejores predicciones que cualquier otro método de cálculo simplificado disponible. Se escogió un proceso constructivo CCD (Cimbrado/Clareado/Descimbrado) con 3 plantas consecutivas cimbradas (2 clareadas y una totalmente cimbrada) con clareados del 50% de los puntales (los correspondientes a las sopandas secundarias según se muestra en la Fig. 6.13). En el estudio se consideró una separación estándar entre sopandas y puntales de 1m (2m entre las sopandas de las plantas clareadas) y hormigonados cada 7 días. Este proceso constructivo fue finalmente adoptado siguiendo la práctica constructiva habitualmente adoptada hoy en día [91,151]. Procesos constructivos como el definido generan cargas elevadas en puntales que, a su vez, genera una situación muy desfavorable frente a la retirada o fallo repentino de elementos del sistema de

apuntalamiento. La carga máxima de los puntales, en este proceso constructivo, se registra en la planta baja, con los puntales conectados a la cimentación, y con el máximo número de plantas consecutivas apuntaladas [8,90]. Los diferentes escenarios de fallo estudiados se definieron para esta situación más desfavorable, con el fallo repentino de elementos del sistema de apuntalamiento de la planta baja cuando se está hormigonado el tercer forjado (14 días).

La posición del puntal más cargado en el momento definido como el más desfavorable se muestra en la Fig. 6.13. La carga máxima obtenida en el puntal más cargado utilizando los métodos simplificados comentados fue de 47.6kN. Para la construcción del edificio se hubiera escogido un tipo de puntal con una capacidad resistente superior a la máxima carga calculada. El puntal escogido fue un puntal estándar de una de las empresas líderes en sistemas de cimbrado a nivel internacional [16] con una resistencia máxima de 47.7kN. Evidentemente, además de escoger un puntal con capacidad resistente suficiente, también se comprobaron que los forjados definidos cumplían con las cargas que recibían durante todas las fases constructivas definidas [67]. Una vista en planta del sistema de apuntalamiento se puede observar en la Fig. 6.13.

6.5.2.2. Descripción del modelo de elementos finitos

En este estudio se realizó un análisis dinámico y no-lineal mediante modelos de elementos finitos (MEF) con LS-DYNA [153]. Se utilizó un algoritmo explícito en el dominio del tiempo para resolver las ecuaciones del movimiento, considerando las no-linealidades geométricas y del material. El MEF tuvo en cuenta tanto la estructura permanente como la estructura temporal (puntales, sopandas y tableros de encofrado) durante la construcción del edificio. Como se ha comentado, el análisis se centró en la fase constructiva más desfavorable con las máximas cargas en los puntales de planta baja cuando se hormigona el tercer forjado, adoptando un proceso constructivo con 3 plantas consecutivas cimbradas, 2 clareadas y una totalmente cimbrado (véase Fig. 6.14). Este MEF fue previamente validado por Olmati et al. [133] y ampliamente estudiado por Buitrago et al. [13]. En estos dos estudios puede encontrarse una descripción en detalle de la simulación llevada a cabo.

Las cargas permanentes (CP) fueron aplicadas automáticamente en el MEF con la definición del peso propio (densidad) de los diferentes elementos. Las sobrecargas (SC) fueron aplicadas uniformemente en cada uno de los forjados como una masa distribuida. Se consideró como valor característico de las sobrecargas un valor de 1.0kN/m² debido exclusivamente a sobrecargas de operarios y posibles acopios (EC-1 [34]), ya que el peso propio del sistema de apuntalamiento fue automáticamente tenido en cuenta por el MEF. En el análisis se utilizó la combinación de cargas frecuente (CP + 0.5·SC) correspondiente a una situación accidental de acuerdo con el Eurocódigo [152] y diversas normas internacionales que utilizan el método de los caminos alternativos de carga. El factor utilizado para las sobrecargas (0.5) en una

combinación de cargas frecuente fue tomado directamente del Eurocódigo [152], dada la inexistencia de un valor más refinado para la fase de construcción durante situaciones accidentales. Este es un aspecto discutible porque los puntales están sometidos, en estas situaciones más desfavorables, a cargas cercanas a sus cargas admisibles y la variabilidad de las cargas impuestas es menor que las consideradas para las estructuras permanentes [149].

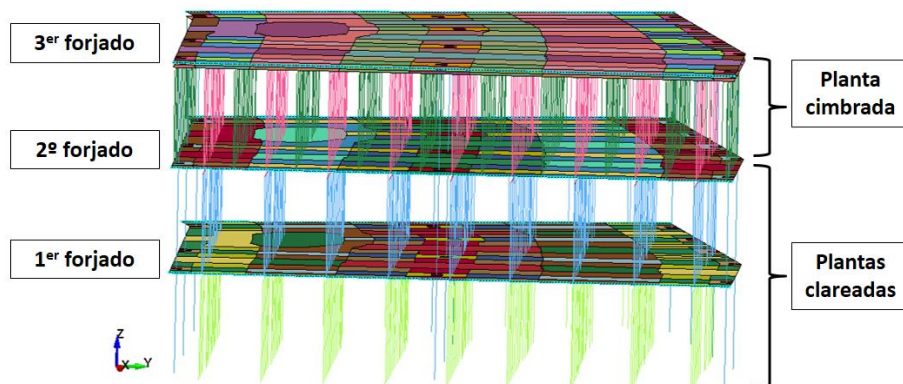


Fig. 6.14. Modelización de la estructura.

Las cargas permanentes se introdujeron en el análisis activando la aceleración de la gravedad gradualmente en el tiempo entre $t = 0s$ y $t = 0.8s$, de idéntica forma al estudio llevado a cabo por Olmati et al. [133]. Una vez introducida la carga permanente y la sobrecarga se introdujeron, tras un intervalo de tiempo de estabilización de la carga, los diferentes escenarios de fallo local repentino que se describen a continuación.

6.5.2.3. Escenarios de fallo local y resultados

En este sub-apartado se definen los diferentes escenarios de fallo local de algunos de los componentes del sistema de apuntalamiento para estudiar el efecto producido en el comportamiento de la estructura permanente y temporal. Este estudio es especialmente relevante debido a que el fallo de puntales es la causa principal de colapso de estructuras de edificios durante su construcción [12].

El objetivo de este estudio previo consistió en determinar los efectos de un fallo repentino en uno o más puntales de la planta baja, que son los que mayores cargas reciben cuando se hormigona la tercera planta con dos plantas clareadas y una totalmente cimbrada. El estudio se centró en el comportamiento del sistema de apuntalamiento y de la estructura permanente en un vano representativo (A2-B1) tal y como muestra la Fig. 6.15. Se definieron 4 escenarios de fallo local diferentes en este vano de estudio (A2-B1): 1) fallo del puntal más cargado (véase Fig. 6.15b); 2) fallo de una sopanda completa de puntales donde se sitúa el puntal más cargado (véase Fig. 6.15c); 3) fallo de la línea completa de puntales que incluye el puntal con

más carga (Véase Fig. 6.15d); y 4) selección incorrecta del tipo de puntal a utilizar durante la construcción.

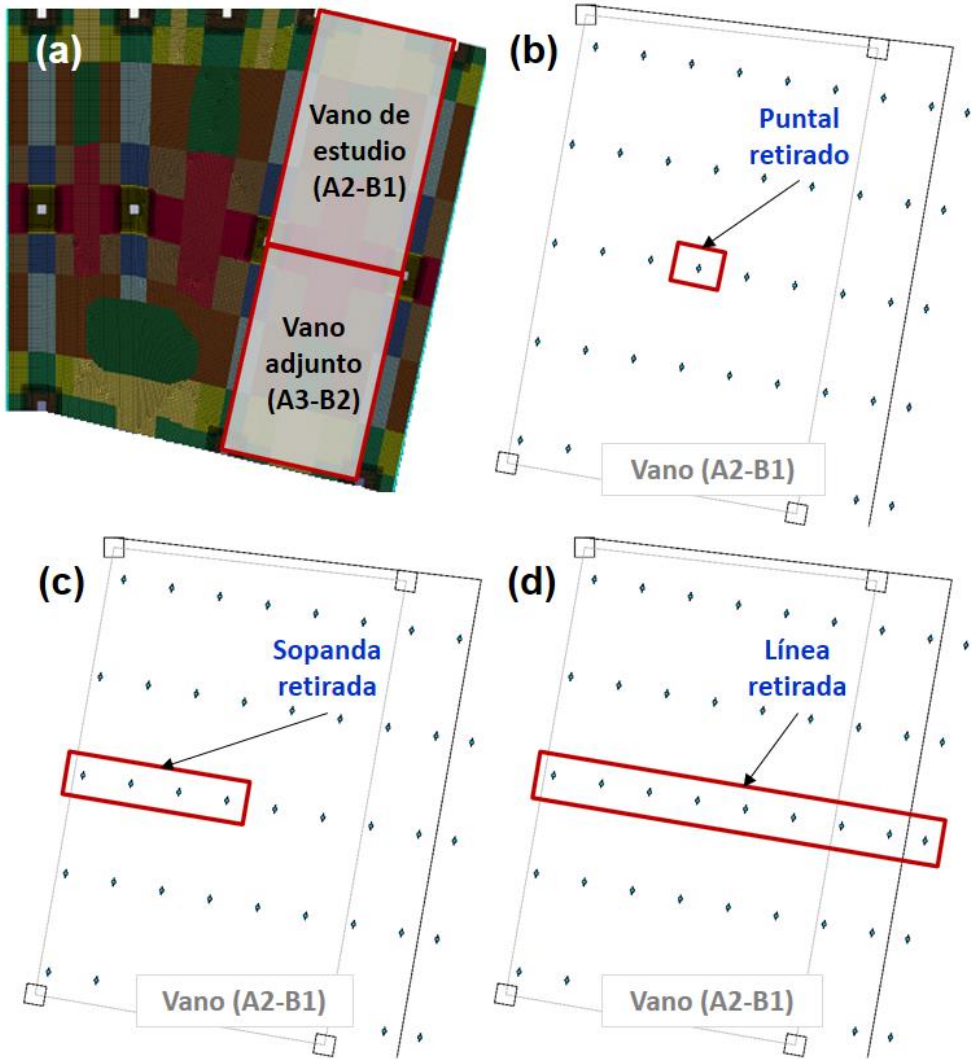


Fig. 6.15. Posición del vano de estudio (a) y escenarios 1, 2 y 3 de fallo repentino de puntales de la planta baja (b, c y d).

Por un lado, los resultados evidenciaron que los escenarios de fallo 1 y 2 no producen el colapso progresivo ni de la estructura temporal (cimbra) ni de la estructura permanente. Sin embargo, pudieron observarse fallos en las condiciones de servicio de los forjados que podrían afectar gravemente a la durabilidad de la estructura.

Por otro lado, los resultados correspondientes a los escenarios de fallo 3 y 4 evidenciaron que, antes escenarios agresivos de fallo, el fallo local puede desencadenar un colapso progresivo de toda la cimbra. Aunque en estos casos analizados no se tradujo en un colapso de toda la estructura, la seguridad de la estructura permanente debería ser evaluada en paralelo con un análisis de costes con el objetivo de determinar posibles trabajos de reparación de la estructura o si debería ser demolida.

Un amplio detalle de los resultados obtenidos para los escenarios de fallo 1 a 4 puede encontrarse en Buitrago et al. [13]. En el siguiente sub-apartado se realiza un análisis en mayor detalle de los escenarios de fallo más agresivos (3 y 4) y qué hubiera ocurrido si en estos casos más problemáticos se hubieran instalado limitadores de carga en los puntales.

6.5.3. Aplicación de los limitadores de carga en los escenarios de fallo con graves consecuencias

En este sub-apartado se presentan y analizan los resultados obtenidos para los escenarios de fallo 3 y 4 correspondientes al fallo de una línea completa de puntales y a la selección incorrecta del tipo de puntal a utilizar durante la construcción, respectivamente. Adicionalmente se analiza qué hubiera ocurrido si se utilizan limitadores de carga en puntales, en comparación a los resultados obtenidos sin el uso de limitadores de carga.

A diferencia de los modelos numéricos estudiados previamente [13], en el estudio realizado en este sub-apartado se han incorporado los limitadores de carga en los puntales. Su introducción se ha realizado empleando la aproximación propuesta en el Capítulo 4, apartado “4.5.2. Definición simplificada del comportamiento de los limitadores de carga para modelos macro-escala”. Según esta propuesta, el comportamiento de un puntal con limitador de carga se define a partir de 4 tramos, con una carga de rotura correspondiente a la carga de rotura del puntal. El comportamiento finalmente adoptado para cada uno de los escenarios de fallo se define en los apartados correspondientes a cada uno de los escenarios. Los puntales con limitadores de carga se modelaron de forma similar a aquellos sin limitadores de carga utilizados en el estudio previo [13]. El conjunto puntal-limitador fue modelado utilizando “*Hughes-Liu beam elements with cross section integration*” [153], que permite considerar el fallo de estos elementos en el nivel de la carga de rotura. El modelo de material utilizado fue “*piecewise linear plasticity material model*” [153] para considerar un comportamiento elástico del puntal correspondiente al primer tramo, y un comportamiento plástico posteriormente, hasta alcanzar el punto de rotura.

6.5.3.1. Análisis del tercer escenario de fallo sin y con la aplicación de limitadores de carga en puntales

El tercer escenario de fallo consiste en el fallo repentino de la línea de puntales completa correspondiente a la línea del puntal más cargado del vano de estudio (véase Fig. 6.15d). Los puntales utilizados en el cimbrado del edificio presentaban una capacidad máxima de 47.7kN. Tal y como se podrá observar posteriormente según los resultados obtenidos del estudio previo [13], este escenario de fallo provocó el colapso progresivo del sistema de apuntalamiento del vano de estudio. Se analizará asimismo qué hubiera ocurrido si se hubieran utilizado limitadores de carga. Los limitadores de carga escogidos presentaban una carga límite de diseño de 40kN, con un máximo desplazamiento plástico efectivo de 2.5mm (altura del hueco de 3mm) y con un comportamiento definido por la curva carga-desplazamiento de la Fig. 6.16. En esta curva se observa: a) un primer tramo con comportamiento elástico y lineal, b) un segundo tramo de transición, c) un tercer tramo con comportamiento eminentemente plástico, y d) un cuarto tramo hasta la carga de rotura donde se ha agotado el máximo desplazamiento plástico permitido.

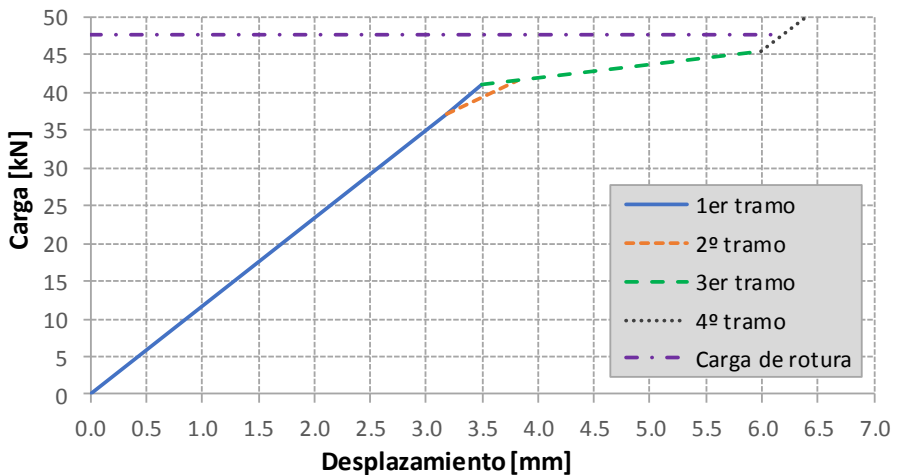


Fig. 6.16. Comportamiento de un puntal con limitador de carga para los puntales del TERCER escenario de fallo.

Para el caso SIN limitadores de carga, la Fig. 6.17 muestra el fallo repentino de la línea de puntales retirada (en $t = 1.1s$) provocando el colapso progresivo del resto de puntales del vano de estudio. Como se puede observar en la secuencia de imágenes de la Fig. 6.17 (con intervalos de 0.1s), cuando la línea central de puntales bajo el forjado 1 se retira, aparece una reacción en cadena en el resto de puntales que provoca su colapso. En cada una de las secuencias de la Fig. 6.17 se ha representado en rojo los puntales que en la siguiente secuencia ya habían fallado porque habían alcanzado su máxima capacidad resistente (su punto de rotura). En este caso, cuando

un número elevado de puntales falla entre $t = 1.1s$ y $t = 1.2s$, el apuntalamiento de planta baja se vuelve más flexible e incrementa la deformación del primer forjado y la carga de los puntales que todavía quedan instalados. A su vez, este incremento de la carga puede sobrepasar la capacidad máxima de los puntales (47.7kN), provocando la rotura de los mismos en cadena. La deformación de la estructura en el caso en el que no se utilizan limitadores de carga en puntales se puede observar en la Fig. 6.18, antes (Fig. 6.18a) y después (Fig. 6.18b) del evento repentino.

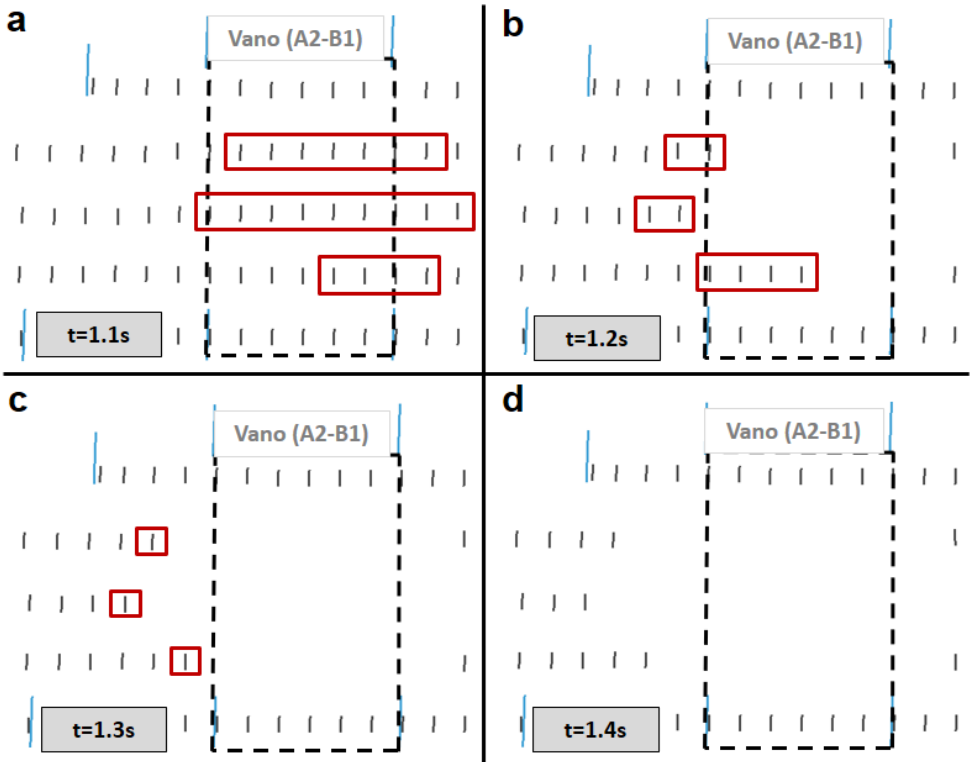


Fig. 6.17. Colapso progresivo del sistema de apuntalamiento en el TERCER escenario de fallo SIN el uso de limitadores de carga en los puntales.

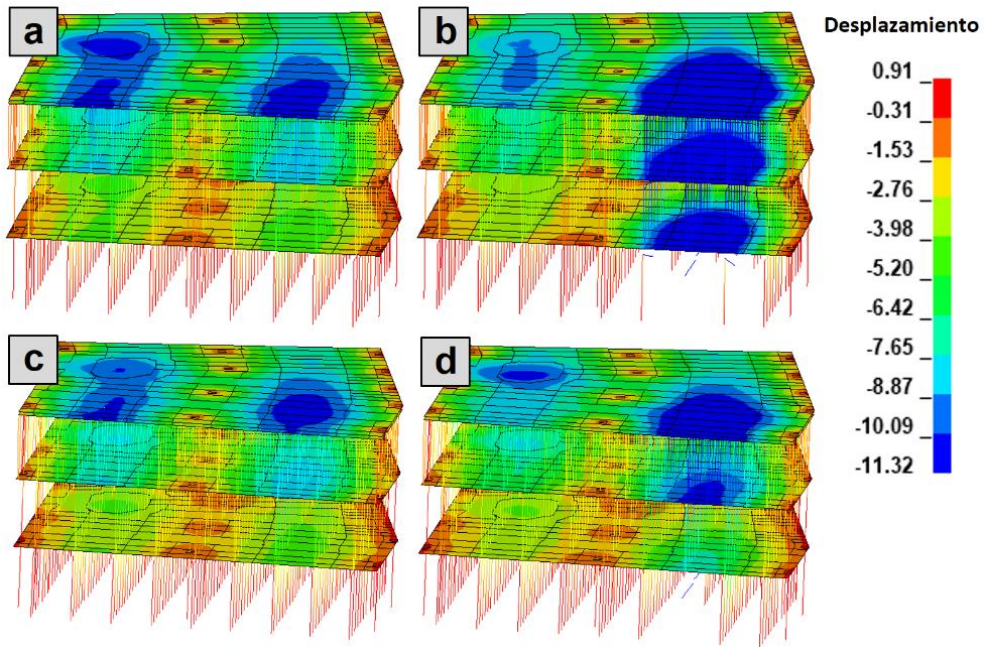


Fig. 6.18. Estructura antes (a y c) y después (b y d) del evento repentino del TERCER escenario de fallo para el caso SIN limitadores de carga (a y b) y CON limitadores de carga (c y d) (unidades en mm).

Sin embargo, el análisis realizado cambia por completo cuando se utilizan limitadores de carga en puntales con una carga límite de 40.0kN. Ante el fallo repentino de una línea completa de puntales, el incremento de la carga registrado en los puntales vecinos no provoca la rotura de los mismos porque tienen limitada su carga por el limitador de carga a valores inferiores a la carga de rotura. Así, los puntales permanecen instalados, resistiendo una carga muy cercana a su máxima carga posible, sin sobrepasarla, y contribuyendo a la sustentación efectiva de los forjados y a la minimización de cualquier tipo de riesgo que podría ocasionarse, bien sea en términos de seguridad estructural o bien en términos de durabilidad de la estructura frente a sus condiciones de servicio. La deformación de la estructura en el caso en el que se utilizan limitadores de carga en puntales se puede observar en la Fig. 6.18, antes (Fig. 6.18c) y después (Fig. 6.18d) del evento repentino. Nótese las elevadas diferencias en el desplazamiento de los forjados entre el modelo SIN limitadores de carga (Fig. 6.18b) y CON limitadores de carga (Fig. 6.18d). Un análisis más detallado de los resultados se realiza en la Fig. 6.19 para el caso SIN limitadores de carga y en la Fig. 6.20 para el caso CON limitadores de carga.

Como se puede observar en la Fig. 6.19a, tras el evento extremo en $t = 1.1s$ (Fig. 6.15d), la carga del puntal más cargado bajo el forjado 1 (véase Fig. 6.13) se reduce drásticamente a cero y la carga del puntal bajo el forjado 2 situado en la misma

vertical se reduce gradualmente (alrededor a un 56%) durante el colapso progresivo gradual del sistema de apuntalamiento. El incremento de la deformación del forjado 1 tras el fallo de la línea completa de puntales provoca que la carga del puntal situado bajo el forjado 2 disminuya considerablemente. Sin embargo, como se puede observar en la Fig. 6.20a, con el uso de limitadores de carga en los puntales se evita el colapso progresivo del sistema de apuntalamiento, cuyo efecto se puede observar en una muy ligera reducción de la carga del puntal situado bajo el forjado 2 en la misma posición que el puntal más cargado. En este caso, al retirar una línea de puntales, el resto de puntales se quedan instalados y no provocan un aumento considerable de la deformación del forjado 1. Consecuentemente, la descarga de los puntales del segundo nivel es reducida.

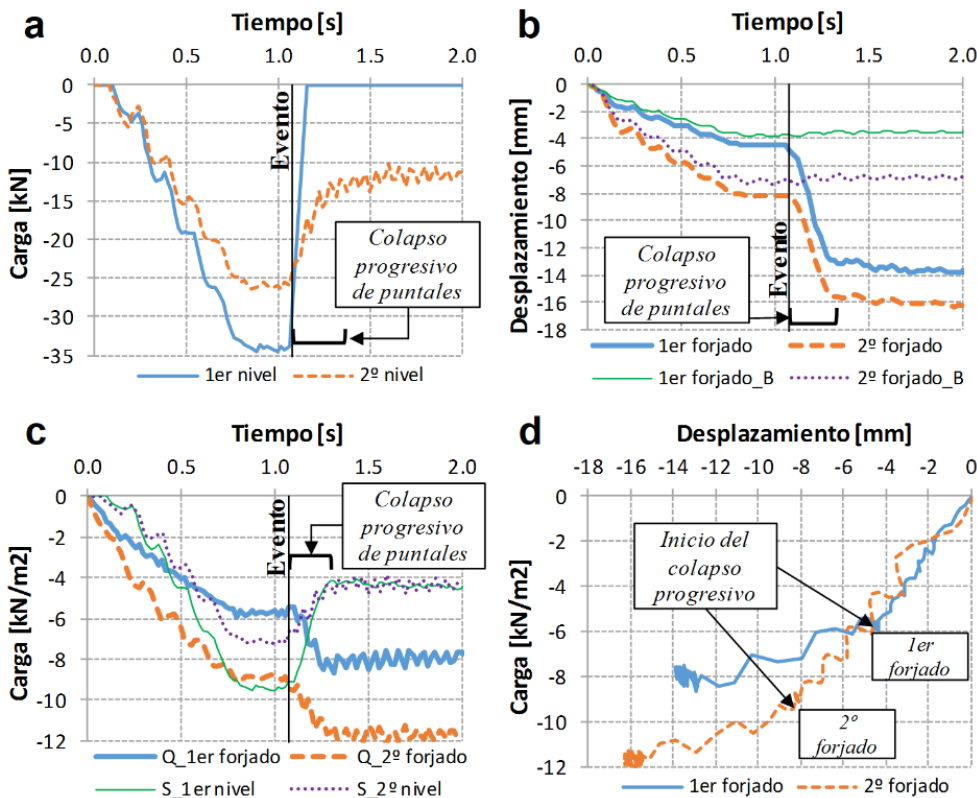


Fig. 6.19. Pautas de comportamiento de los forjados y el sistema de apuntalamiento en el TERCER escenario de fallo SIN limitadores de carga en puntales: a) carga de los puntales bajo los forjados 1 y 2 en la posición del puntal más cargado de la planta baja, b) desplazamiento de los forjados 1 y 2 en la posición del puntal más cargado de planta baja para el vano de estudio y el vano adjunto (B), c) carga por unidad de superficies de los forjados 1 y 2 (Q) y del sistema de apuntalamiento (S) del primer y segundo nivel en el vano de estudio, y d) curvas carga-desplazamiento de los forjados 1 y 2 para la posición del puntal más cargado de la planta baja.

Las líneas más gruesas de la Fig. 6.19b muestran como el colapso progresivo de puntales drásticamente incrementa el desplazamiento vertical de los forjados 1 (alrededor a los 9mm de incremento) y 2 (alrededor a 8mm de incremento) en la posición del puntal más cargado de planta baja. El desplazamiento es superior en el forjado 1, aspecto que confirma la reducción de la carga de los puntales del segundo nivel. La Fig. 6.19b también muestra como un evento extremo ocurrido en el sistema de apuntalamiento no afecta al vano adjunto (B) A3-B2. Los desplazamientos de los forjados en centro de vano para el vano adjunto se han representado con líneas más finas en la Fig. 6.19b. Conclusiones totalmente diferentes se obtienen de la Fig. 6.20b si se utilizan limitadores de carga en puntales. El aumento del desplazamiento de los forjados debido a la retirada repentina de una línea completa de puntales es muy reducido porque los limitadores de carga han sido capaces de mantener el resto de puntales instalados y operativos, cumpliendo su función de sustentación de los forjados.

La Fig. 6.19c muestra las cargas por unidad de superficies (kN/m^2) del sistema de apuntalamiento (S) y de los forjados (Q) en cada una de las plantas. No se representan los resultados para la tercera planta porque se trata de una planta recién hormigonada, donde los forjados no aportan resistencia, y los puntales presentan una carga equivalente a las cargas gravitatorias (permanentes y sobrecargas) aplicadas en función del área tributaria de cada puntal. En la Fig. 6.19c se presenta el comportamiento global de la estructura afectada por el evento extremo definido. Los resultados muestran la transmisión de cargas entre forjados y puntales antes y después de la retirada repentina de una línea completa de puntales. La retirada de una línea completa de puntales de la planta baja provoca una reducción significativa de la rigidez del sistema de apuntalamiento de esta planta. Esta reducción de rigidez provoca que el forjado 1 asuma más carga (alrededor a 2.5kN/m^2 más), mientras que la carga del sistema de apuntalamiento de la planta baja en el vano de estudio se reduce drásticamente debido a que la mayor parte de los puntales han colapsado (alrededor a 5.0kN/m^2 menos). Además, la mayor flexibilidad del sistema de apuntalamiento de la planta baja provoca una mayor deformabilidad del sistema de soporte del forjado 2 (el sistema de soporte del forjado 2 está formado por el forjado 1 y por el sistema de apuntalamiento de los niveles 1 y 2). Por lo tanto, la carga que recibe el forjado 2 también aumenta (alrededor a 2.5kN/m^2 más) y la carga del sistema de apuntalamiento del segundo nivel se reduce (alrededor a 2.5kN/m^2 menos). La lectura es totalmente distinta con el uso de limitadores de carga en los puntales. Como se puede observar en la Fig. 6.20c, la transmisión de cargas entre forjados y puntales ligeramente se modifica tras el evento accidental definido. La efectividad de los limitadores de carga, manteniendo los puntales instalados y colaborando en la sustentación de los forjados, provoca que la transmisión de cargas sea similar, incluso con la aparición de un escenario de fallo extremo.

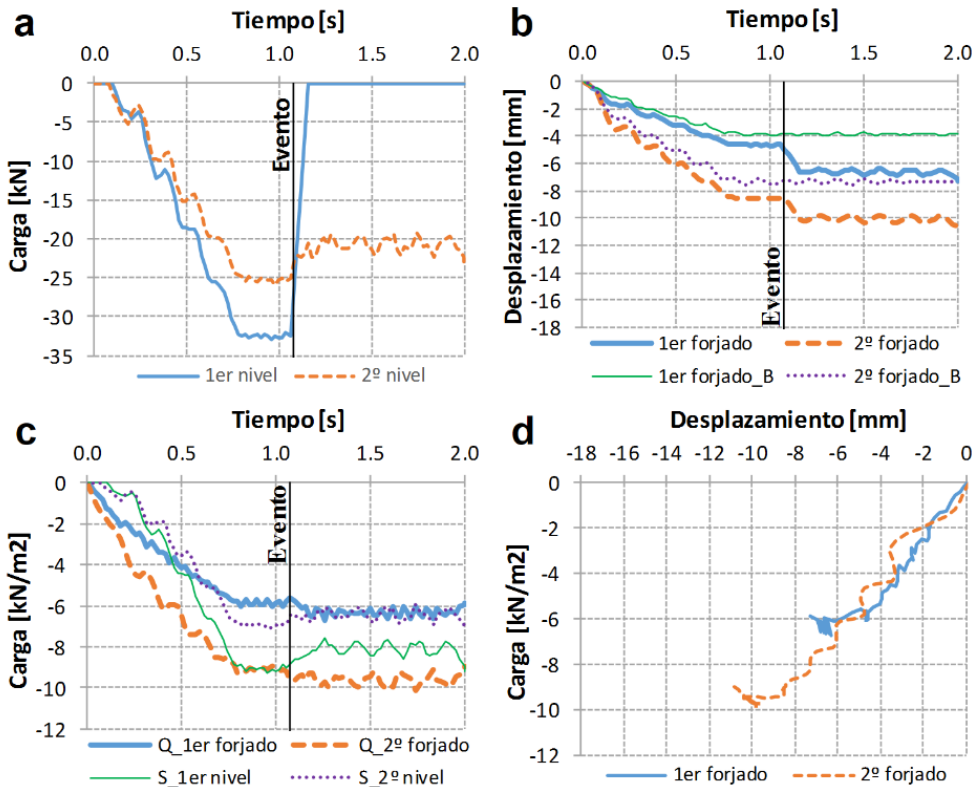


Fig. 6.20. Pautas de comportamiento de los forjados y el sistema de apuntalamiento en el TERCER escenario de fallo CON limitadores de carga en puntales: a) carga de los puntales bajo los forjados 1 y 2 en la posición del puntal más cargado de la planta baja, b) desplazamiento de los forjados 1 y 2 en la posición del puntal más cargado de planta baja para el vano de estudio y el vano adjunto (B), c) carga por unidad de superficies de los forjados 1 y 2 (Q) y del sistema de apuntalamiento (S) del primer y segundo nivel en el vano de estudio, y d) curvas carga-desplazamiento de los forjados 1 y 2 para la posición del puntal más cargado de la planta baja.

La Fig. 6.19d muestra las curvas carga-desplazamiento de los forjados 1 y 2 tomando como referencia el desplazamiento de los forjados en la posición del puntal más cargado de planta baja (centro de vano aproximadamente). La pendiente de estas curvas (equivalente a la rigidez de los forjados) experimenta una notable reducción al inicio del colapso progresivo del sistema de apuntalamiento. La amplia reducción en la rigidez de los forjados es la primera indicación del elevado nivel de fisuración del forjado que desarrolla tras la aparición del evento accidental. Por su parte, la Fig. 6.20d muestra los mismos resultados para el caso en el que se utilizan limitadores de carga en puntales. En este caso, ambos forjados experimentan una rigidez constante, demostrando que la fisuración de los forjados es muy reducida (sin efecto apreciable en el comportamiento del forjado) con el uso de limitadores de carga, además de evitar el colapso progresivo del sistema de apuntalamiento.

Para analizar en mayor detalle la fisuración de los forjados, la Fig. 6.21 y la Fig. 6.22 muestran los momentos flectores en el vano de estudio sin y con el uso de limitadores de carga respectivamente. La Fig. 6.21 presentan los momentos flectores en el eje más desfavorable (momentos flectores M_x a lo largo de la mayor longitud del vano) para el caso SIN limitadores de carga. Tanto los momentos positivos como los negativos de ambos forjados (véase Fig. 6.21b y Fig. 6.21d) son notablemente superiores a los registrados antes del evento extremo (véase Fig. 6.21a y Fig. 6.21c). La Fig. 6.21 muestra el desarrollo de fisuración severa en la posición donde ocurre el evento extremo (la retirada de la línea de puntales repentina, según la Fig. 6.15d) y en la zona próxima a los pilares. Los momentos de fisuración son $51.6\text{kN}\cdot\text{m/m}$ y $45.3\text{kN}\cdot\text{m/m}$ para el primer y segundo forjado respectivamente. Los momentos a lo largo de la menor longitud del vano (no aparecen representados) también causan fisuración severa en las zonas de los pilares. A pesar del elevado daño evaluado, los forjados cumplen con los requerimientos a flexión y punzonamiento especificados en el EC-2 [128] para la combinación de cargas accidental considerada en el estudio.

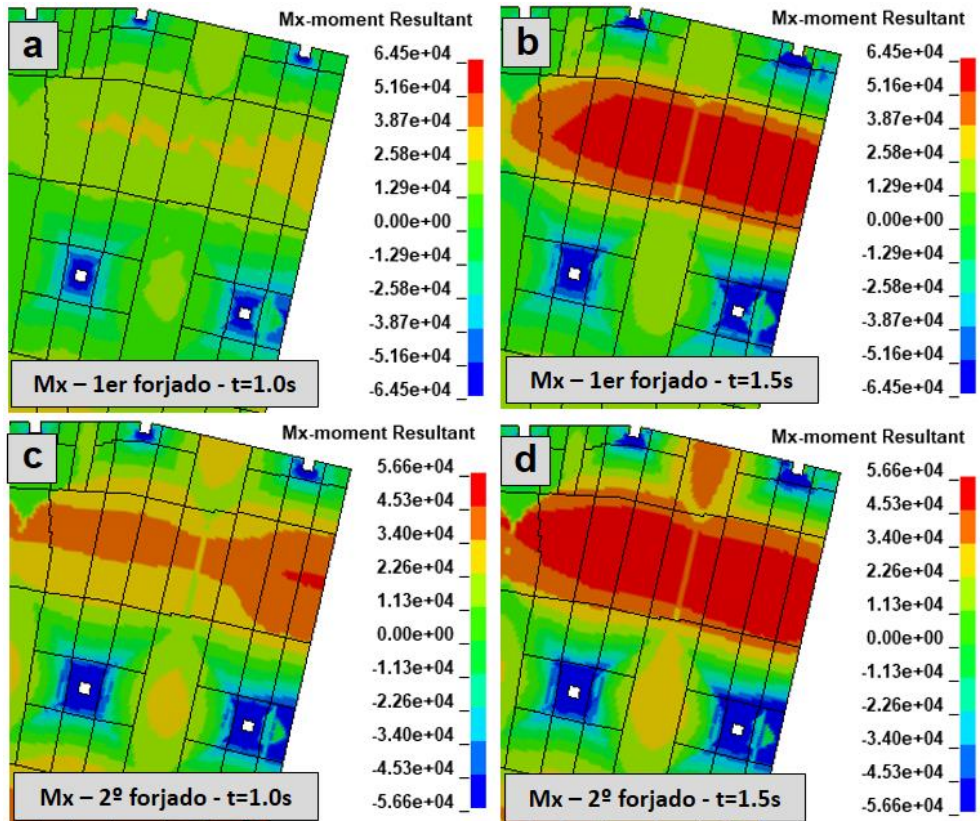


Fig. 6.21. Momentos del primer (a y b) y segundo (c y d) forjado, antes (a y c) y después (b y d) del evento accidental definido para el TERCER escenario de fallo SIN el uso de limitadores de carga en puntales (unidades en $\text{N}\cdot\text{m/m}$).

La Fig. 6.22 presentan los mismos resultados obtenidos CON el uso de limitadores de carga en puntales. El empleo de limitadores de carga evitó el colapso progresivo del sistema de apuntalamiento. Como se ha comentado anteriormente, este hecho provocó que la carga recibida por los forjados fuera significativamente inferior. La Fig. 6.22 demuestra como el nivel de fisuración finalmente obtenido cuando se utilizan limitadores de carga en puntales es nulo para el primer forjado y muy reducido para el segundo, mejorando drásticamente el comportamiento de la estructura permanente (también el comportamiento de la cimbra) respecto al caso en el que no se utilizan limitadores de carga.

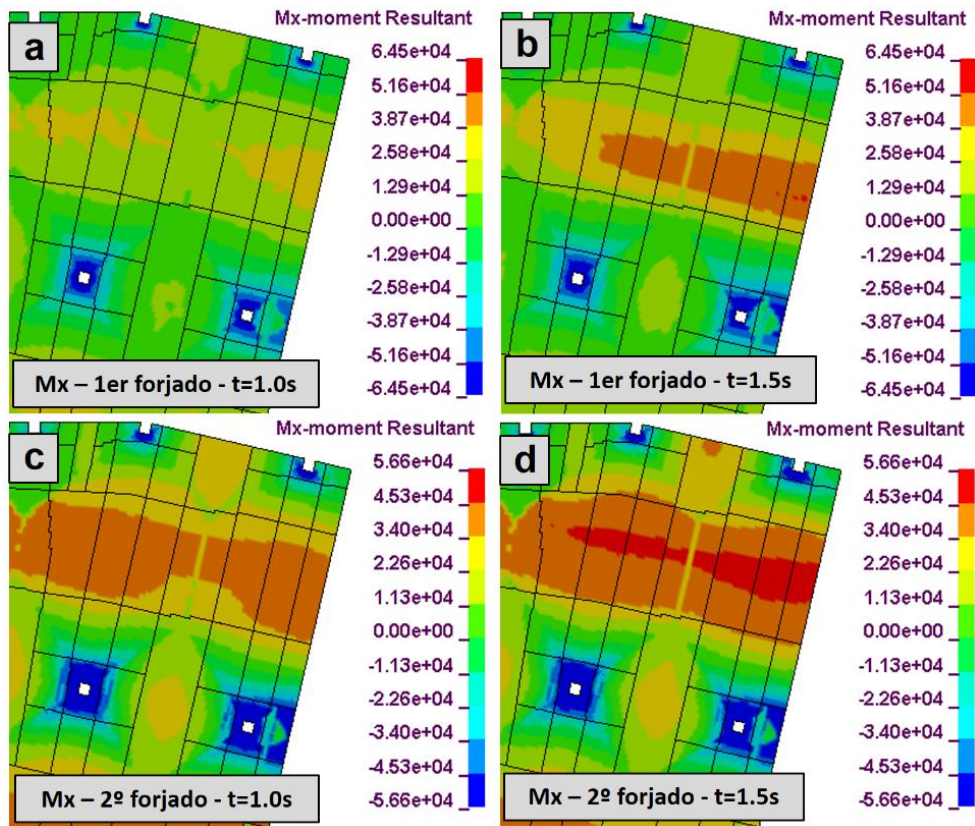


Fig. 6.22. Momentos del primer (a y b) y segundo (c y d) forjado, antes (a y c) y después (b y d) del evento accidental definido para el TERCER escenario CON el uso de limitadores de carga en puntales (unidades en N·m/m).

Puede concluirse que a pesar que el evento accidental causa el colapso progresivo del sistema de apuntalamiento, la estructura permanente no falla debido a eficientes caminos alternativos de carga que pueden ser activados en el conjunto estructura-sistema de apuntalamiento tras el escenario de fallo. Por ejemplo, la distribución de la carga del sistema de apuntalamiento colapsado es crucial, distribuyéndose entre

los forjados 1 y 2 como se puede observar de los desplazamientos y cargas obtenidas. Aunque los forjados reciben una carga superior tras el evento accidental, no se han registrados amplificaciones dinámicas de las cargas ni de los desplazamientos. El elevado nivel de fisuración obtenido si no se utilizan limitadores de carga en puntales podría desencadenar problemas en las condiciones de servicio y durabilidad de la estructura. En estos casos, la seguridad de la estructura necesitaría ser evaluada junto con un análisis de costes con el objetivo de determinar posibles medidas de reparación de los forjados o si deben ser demolidos. Con el uso de limitadores de carga en puntales se evitarían todos estos problemas, mejorando el comportamiento y la seguridad de la estructura durante la construcción frente a eventos accidentales, y evitando así afectar las condiciones de servicio o durabilidad de la estructura, e incluso evitando la necesidad de demoler o reparar la estructura.

6.5.3.2. Análisis del cuarto escenario de fallo sin y con la aplicación de limitadores de carga en puntales

Durante el diseño de la estructura temporal de apuntalamiento, o incluso en la entrega del material a utilizar en la obra, pueden ocurrir errores en la correcta elección de puntales (por ejemplo, un dimensionamiento incorrecto) debido a múltiples razones [13]. En este contexto, el cuarto escenario de fallo definido consiste en el uso de un tipo de puntal con características resistentes inferiores a aquellos utilizados en los anteriores escenarios de fallo. El tipo de puntal utilizado en el análisis numérico es del mismo proveedor tomado como referencia con anterioridad [16]. La carga última del puntal escogido, inmediatamente inferior al anteriormente escogido de 47.7kN, es de 30.6kN para las alturas de trabajo del edificio considerado. Esta carga última es notablemente inferior a la anteriormente considerada.

Tal y como se podrá observar posteriormente según los resultados obtenidos del estudio previo [13], este escenario de fallo provocó el colapso progresivo del sistema de apuntalamiento del vano de estudio durante el hormigonado del forjado 3. Se analizará, asimismo y a continuación, qué hubiera ocurrido si se hubieran utilizado limitadores de carga. Los limitadores de carga escogidos presentaban una carga límite de diseño de 25.0kN, con un máximo desplazamiento plástico efectivo de 2.5mm (altura del hueco de 3mm) y con un comportamiento definido por la curva carga-desplazamiento de la Fig. 6.23.

Tras cambiar las características mecánicas de los puntales (sección y carga última) en el modelo numérica por aquellas del nuevo tipo de puntal, la Fig. 6.24 muestra como la aplicación gradual de toda la carga gravitatoria (con una aplicación pseudo-estática) entre $t = 0.0s$ y $t = 0.8s$ provoca el colapso progresivo del sistema de apuntalamiento en $t = 0.66s$ en el caso SIN limitadores de carga en puntales.

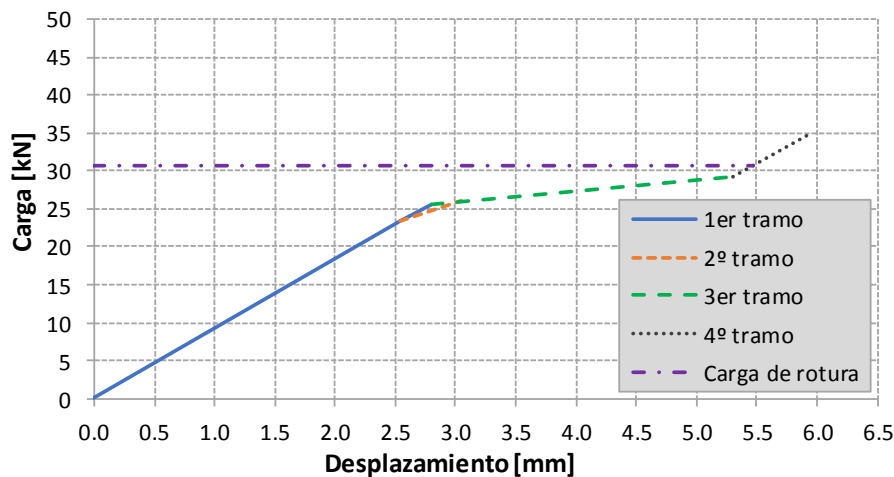


Fig. 6.23. Comportamiento de un puntal con limitador de carga para los puntales del CUARTO escenario de fallo.

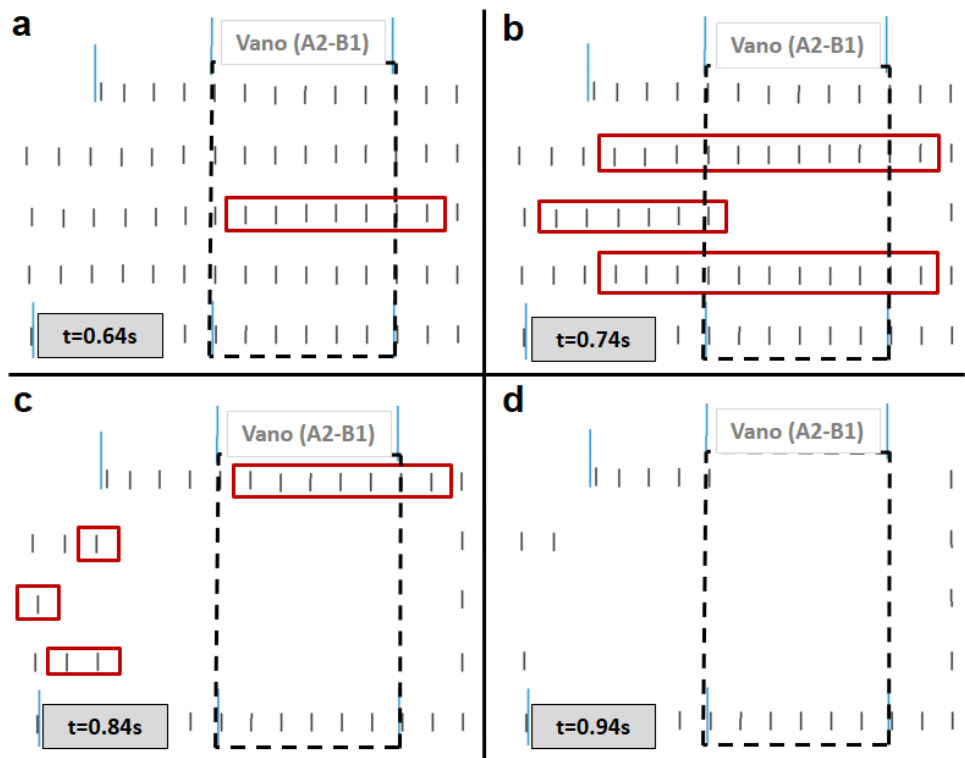


Fig. 6.24. Colapso progresivo del sistema de apuntalamiento en el CUARTO escenario de fallo SIN el uso de limitadores de carga en puntales.

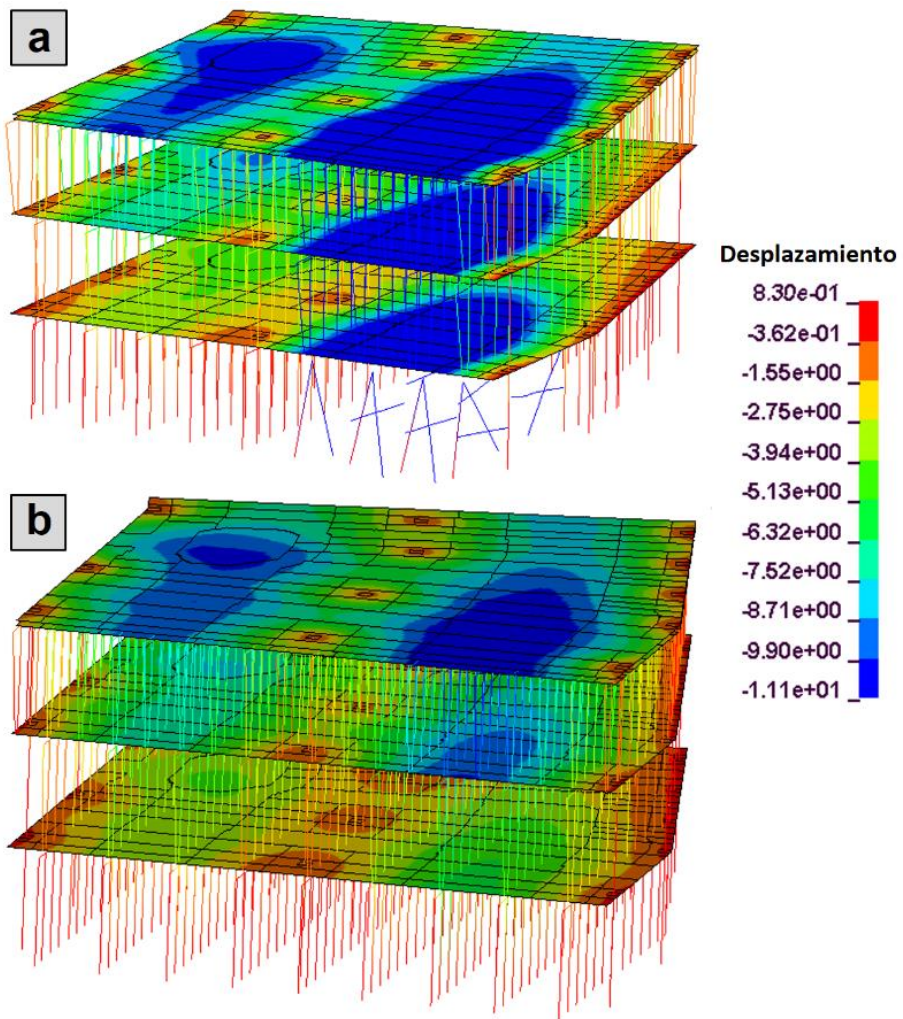


Fig. 6.25. Estructura después del evento accidental para el CUARTO escenario de fallo SIN limitadores de carga en puntales (a) y CON limitadores de carga (b) (unidades en mm).

Como se puede observar en la secuencia de imágenes de la Fig. 6.24 (con intervalos de 0.1s), todos los puntales bajo el forjado 1 colapsan uno tras otro tras el inicio del colapso, afectando al vano de estudio y a un vano adjunto. Evidentemente, los puntales que quedan instalados no han superado la carga última. En cada una de las secuencias de la Fig. 6.24 se ha representado en rojo los puntales que en la siguiente secuencia ya habían fallado porque habían alcanzado su máxima capacidad resistente (su punto de rotura). En este caso, cuando un número elevado de puntales falla entre $t = 0.64s$ y $t = 0.74s$, el apuntalamiento de planta baja se vuelve más flexible e incrementa la deformación del primer forjado y la carga de los puntales que todavía quedan instalados. A su vez, este incremento de la carga puede sobrepasar la

capacidad máxima de los puntales (30.6kN), provocando la rotura de los mismos en cadena. La deformación de la estructura tras el colapso de puntales ($t = 1.5s$) en el caso SIN limitadores de carga se puede observar en la Fig. 6.25a.

Sin embargo, el análisis realizado cambia por completo cuando se utilizan limitadores de carga en puntales con una carga límite de 25kN. Ante la aplicación por completo de las cargas gravitatorias de forma gradual según la combinación de acciones accidental, ningún puntal sobrepasa su carga última (30.6kN), sin provocar la rotura de ninguno de los puntales. Así, los puntales permanecen instalados, resistiendo una carga muy cercana a su máxima carga posible, sin sobrepasarla, y contribuyendo a la sustentación efectiva de los forjados y a la minimización de cualquier tipo de riesgo que podría ocasionarse, bien sea en términos de seguridad estructural o bien en términos de durabilidad de la estructura o sus condiciones de servicio. La deformación de la estructura en el caso CON limitadores de carga en puntales se puede observar en la Fig. 6.25b para $t = 1.5s$. Nótese las elevadas diferencias en el desplazamiento de los forjados entre el modelo SIN limitadores de carga (Fig. 6.25a) y CON limitadores de carga (Fig. 6.25b). Un análisis más detallado de los resultados se realiza en la Fig. 6.26 para el caso SIN limitadores de carga y en la Fig. 6.27 para el caso CON limitadores de carga.

Como se puede observar en la Fig. 6.26a, el puntal más cargado bajo el forjado 1 (véase Fig. 6.13) alcanza su carga de rotura en $t = 0.66s$. El nivel de carga se reduce drásticamente a cero y la carga del puntal bajo el forjado 2, situado en la misma vertical, se reduce gradualmente (alrededor a un 58%) durante el colapso progresivo gradual del sistema de apuntalamiento. El incremento de la deformación del forjado 1 tras el colapso progresivo de puntales provoca que la carga del puntal situado bajo el forjado 2 disminuya considerablemente. Sin embargo, como se puede observar en la Fig. 6.27a, con el uso de limitadores de carga en los puntales se evita el colapso progresivo del sistema de apuntalamiento, cuyo efecto se puede observar en una limitación de la carga del puntal más cargado bajo el forjado 1 en valores alrededor a la carga límite (25kN), colaborando a sustentar el forjado incluso después de la aplicación de toda la carga gravitatoria según la combinación de acciones accidental. En este caso, todos los puntales se quedan instalados y no provocan un aumento considerable de la deformación del forjado 1 ni la carga recibida por los mismos.

Las líneas más gruesas de la Fig. 6.26b muestran como el colapso progresivo de puntales drásticamente incrementa el desplazamiento vertical de los forjados 1 (alrededor a los 15.3mm de incremento) y 2 (alrededor a 14.0mm de incremento) en la posición del puntal más cargado de planta baja. El desplazamiento es superior en el forjado 1, aspecto que confirma la reducción de la carga de los puntales del segundo nivel en el caso SIN limitadores de carga en puntales. La Fig. 6.26b también muestra como un evento extremo ocurrido en el sistema de apuntalamiento no afecta al vano adjunto (B) A3-B2. Los desplazamientos de los forjados en centro de vano para el vano adjunto se han representado con líneas más finas en la Fig. 6.26b.

Conclusiones totalmente diferentes se obtienen de la Fig. 6.27b si se utilizan limitadores de carga en puntales. El desplazamiento de los forjados se mantiene en niveles reducidos al evitar el colapso progresivo del sistema de apuntalamiento. Los limitadores de carga han sido capaces de mantener todos los puntales instalados y operativos, cumpliendo su función de sustentación de los forjados.

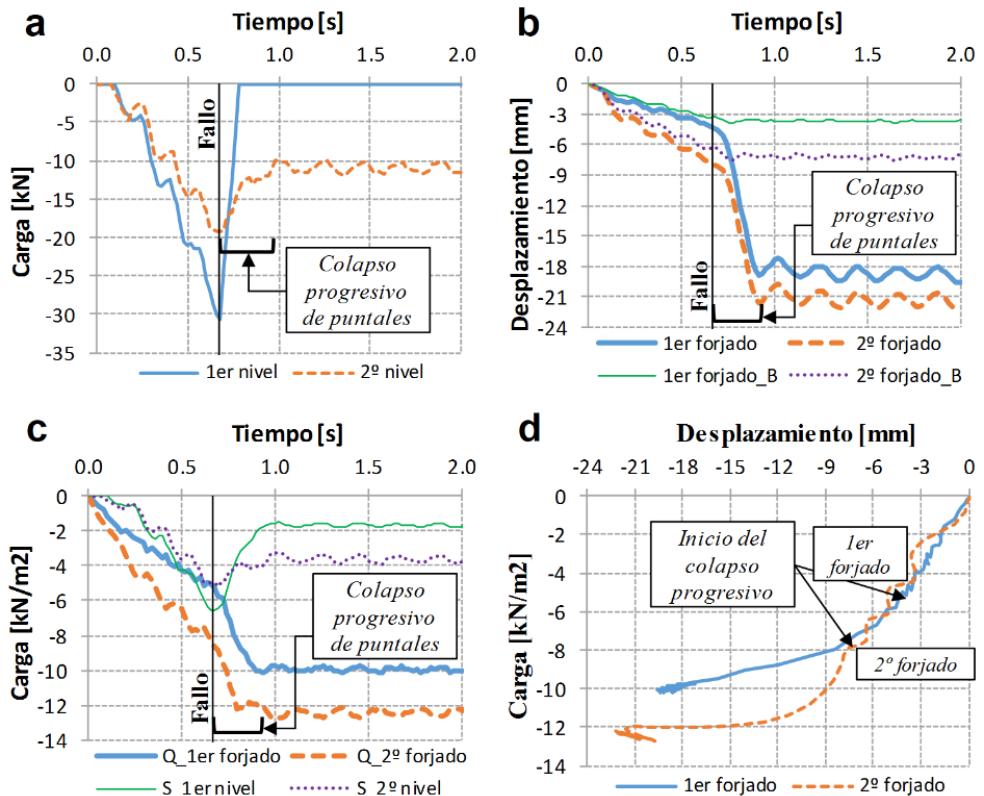


Fig. 6.26. Pautas de comportamiento de los forjados y el sistema de apuntalamiento en el CUARTO escenario de fallo SIN limitadores de carga en puntales: a) carga de los puntales bajo los forjados 1 y 2 en la posición del puntal más cargado de la planta baja, b) desplazamiento de los forjados 1 y 2 en la posición del puntal más cargado de planta baja para el vano de estudio y el vano adjunto (B), c) carga por unidad de superficies de los forjados 1 y 2 (Q) y del sistema de apuntalamiento (S) del primer y segundo nivel en el vano de estudio, y d) curvas carga-desplazamiento de los forjados 1 y 2 para la posición del puntal más cargado de la planta baja.

La Fig. 6.26c muestra las cargas por unidad de superficies (kN/m^2) del sistema de apuntalamiento (S) y de los forjados (Q) en cada una de las plantas. No se representan los resultados para la tercera planta porque se trata de una planta recién hormigonada, donde los forjados no aportan resistencia, y los puntales presentan una carga equivalente a las cargas gravitatorias (permanentes y sobrecargas) aplicadas en función del área tributaria de cada puntal. En la Fig. 6.26c se presenta el

comportamiento global de la estructura afectada por el escenario de fallo definido. Los resultados muestran la transmisión de cargas entre forjados y puntales antes, durante y después del evento accidental. El colapso progresivo del sistema de apuntalamiento de la planta baja provoca una reducción significativa de la rigidez del sistema de apuntalamiento de esta planta. Esta reducción de rigidez provoca que el forjado 1 asuma más carga, y el sistema de apuntalamiento del primer nivel reciba menos carga. Además, la mayor flexibilidad del sistema de apuntalamiento de la planta baja provoca una mayor deformabilidad del sistema de soporte del forjado 2 (el sistema de soporte del forjado 2 está formado por el forjado 1 y por el sistema de apuntalamiento de los niveles 1 y 2). Por lo tanto, la carga que recibe el forjado 2 también aumenta y la carga del sistema de apuntalamiento del segundo nivel se reduce. La lectura es totalmente distinta con el uso de limitadores de carga en los puntales. Como se puede observar en la Fig. 6.27c, no se aprecian cambios en la transmisión de cargas entre forjados y puntales al no producirse el colapso progresivo del sistema de apuntalamiento. La efectividad de los limitadores de carga, manteniendo los puntales instalados y colaborando en la sustentación de los forjados, provoca que la transmisión de cargas no se vea modificada.

La Fig. 6.26d muestra las curvas carga-desplazamiento de los forjados 1 y 2 tomando como referencia el desplazamiento de los forjados en la posición del puntal más cargado de planta baja (centro de vano aproximadamente). La pendiente de estas curvas (equivalente a la rigidez de los forjados) experimenta una notable reducción al inicio del colapso progresivo del sistema de apuntalamiento. La amplia reducción en la rigidez de los forjados es la primera indicación del elevado nivel de fisuración del forjado que desarrolla tras la aparición del evento accidental. Por su parte, la Fig. 6.27d muestra los mismos resultados para el caso en el que se utilizan limitadores de carga en puntales. En este caso, ambos forjados experimentan una rigidez constante, demostrando que la fisuración de los forjados es muy reducida (sin efecto apreciable en el comportamiento del forjado) con el uso de limitadores de carga, además de evitar el colapso progresivo del sistema de apuntalamiento.

Para analizar en mayor detalle la fisuración de los forjados, la Fig. 6.28 y la Fig. 6.29 muestran los momentos flectores en el vano de estudio sin y con el uso de limitadores de carga respectivamente. La Fig. 6.28 presentan los momentos flectores para el caso SIN limitadores de carga en $t = 1.5s$. Los resultados muestran el desarrollo de fisuración severa en casi todo el forjado, tanto en la zona de centro de vano como en la zona próxima a los pilares, tras el colapso progresivo del sistema de apuntalamiento de planta baja. Los momentos de fisuración son $51.6kN \cdot m/m$ y $45.3kN \cdot m/m$ para el primer y segundo forjado respectivamente. A pesar del elevado daño evaluado y las grandes cargas recibidas por los forjados a una edad temprana, los forjados cumplen con los requerimientos a flexión y punzonamiento especificados en el EC-2 [128] para la combinación de cargas accidental considerada en el estudio.

La Fig. 6.29 presentan los mismos resultados obtenidos CON el uso de limitadores de carga en puntales. El empleo de limitadores de carga evitó el colapso progresivo del sistema de apuntalamiento. Como se ha comentado anteriormente, este hecho provocó que la carga recibida por los forjados fuera significativamente inferior. La Fig. 6.29 demuestra como el nivel de fisuración finalmente obtenido cuando se utilizan limitadores de carga en puntales es casi nulo para el primer forjado y reducido para el segundo, mejorando drásticamente el comportamiento de la estructura permanente (también el comportamiento de la cimbra) respecto al caso en el que no se utilizan limitadores de carga.

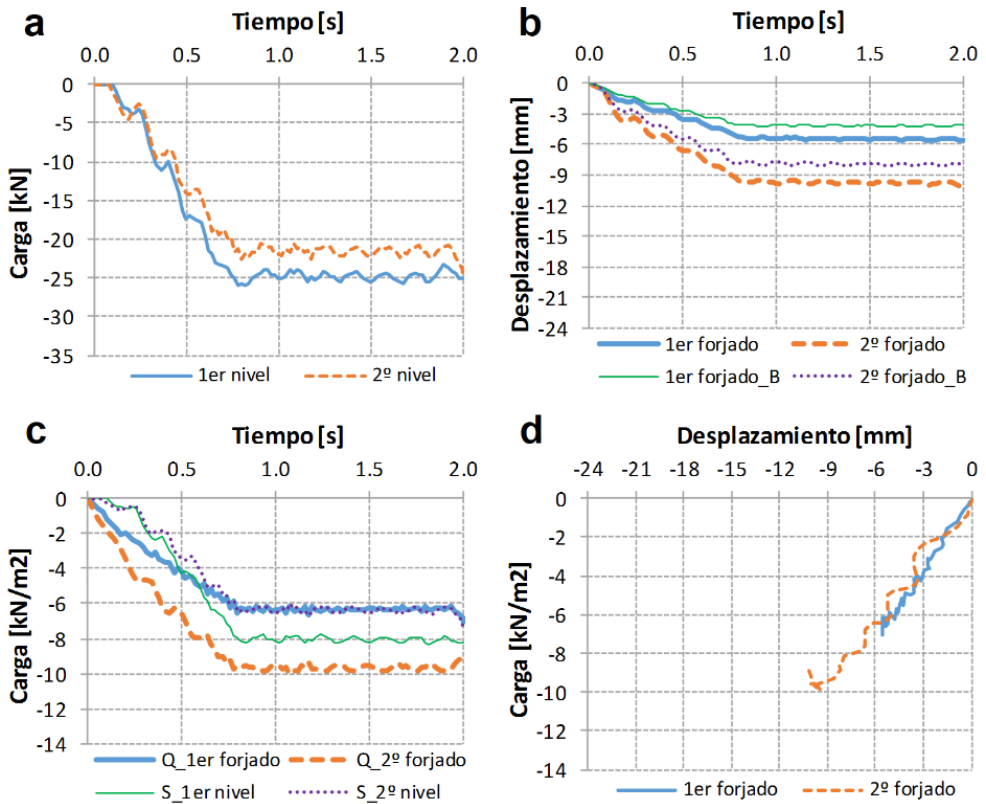


Fig. 6.27. Pautas de comportamiento de los forjados y el sistema de apuntalamiento en el CUARTO escenario de fallo CON limitadores de carga en puntales: a) carga de los puntales bajo los forjados 1 y 2 en la posición del puntal más cargado de la planta baja, b) desplazamiento de los forjados 1 y 2 en la posición del puntal más cargado de planta baja para el vano de estudio y el vano adjunto (B), c) carga por unidad de superficies de los forjados 1 y 2 (Q) y del sistema de apuntalamiento (S) del primer y segundo nivel en el vano de estudio, y d) curvas carga-desplazamiento de los forjados 1 y 2 para la posición del puntal más cargado de la planta baja.

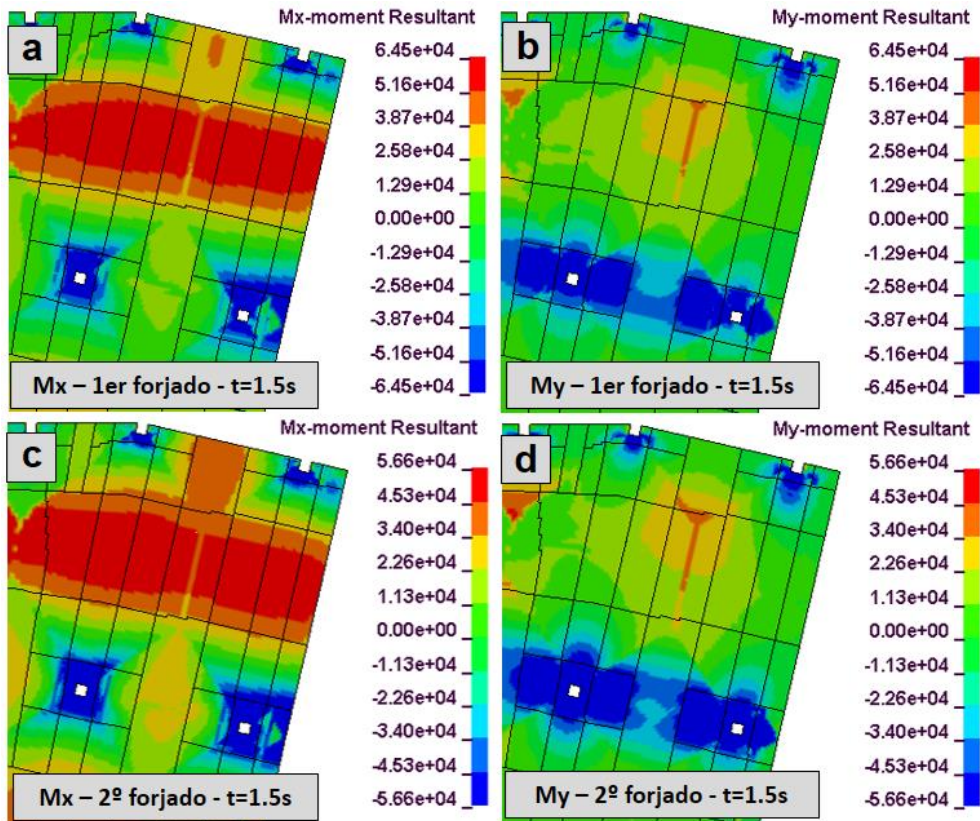


Fig. 6.28. Momentos del primer (a y b) y segundo (c y d) forjado después del evento accidental definido para el CUARTO escenario de fallo SIN el uso de limitadores de carga en puntales (unidades en N·m/m).

Puede concluirse que, a pesar del colapso progresivo del sistema de apuntalamiento, la estructura permanente no falla debido a eficientes caminos alternativos de carga que pueden ser activados en el conjunto estructura-sistema de apuntalamiento tras el escenario de fallo. Por ejemplo, la distribución de la carga del sistema de apuntalamiento colapsado es crucial, distribuyéndose entre los forjados 1 y 2 como se puede observar de los desplazamientos y cargas obtenidas. Aunque los forjados reciben una carga superior tras el colapso progresivo de puntales, y los desplazamientos registrados hayan sido superiores que en los escenarios anteriores, no se han registrados amplificaciones dinámicas de las cargas ni de los desplazamientos. El elevado nivel de fisuración obtenido si no se utilizan limitadores de carga en puntales podría, con elevada probabilidad, desencadenar problemas en las condiciones de servicio y durabilidad de la estructura. En estos casos, la seguridad de la estructura necesitaría ser evaluada junto con un análisis de costes con el objetivo de determinar posibles medidas de reparación de los forjados o si deben ser demolidos. Con el uso de limitadores de carga en puntales se evitarían todos estos

problemas, mejorando el comportamiento y la seguridad de la estructura durante la construcción frente a eventos accidentales (incluso una mala elección del tipo de puntal), y evitando así afectar las condiciones de servicio o durabilidad de la estructura, e incluso evitando la necesidad de demoler o reparar la estructura.

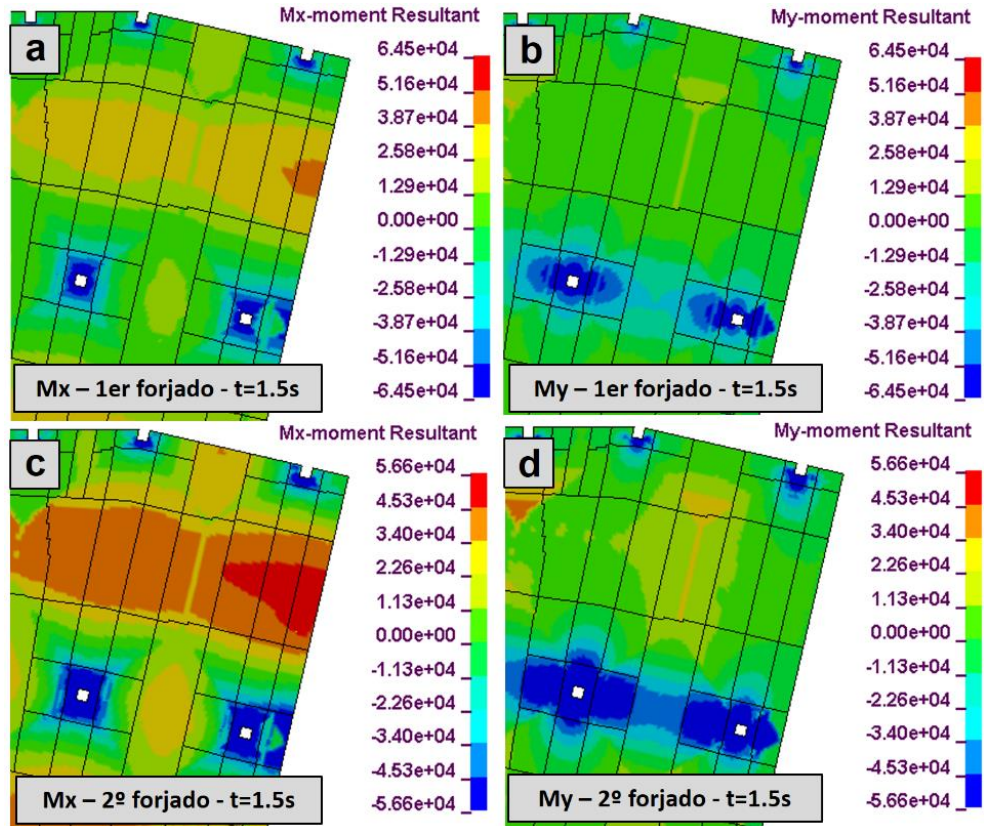


Fig. 6.29. Momentos del primer (a y b) y segundo (c y d) forjado en $t = 1.5$ s para el CUARTO escenario de fallo CON el uso de limitadores de carga en puntales (unidades en $\text{N} \cdot \text{m}/\text{m}$).

6.6. Conclusiones

En este capítulo se ha evaluado el efecto positivo de los limitadores de carga desde diferentes puntos de vista:

- Efecto positivo de los limitadores de carga durante la construcción de estructuras de edificios. Se ha escogido el ensayo experimental como marco de referencia para el estudio.
- Efecto positivo de los limitadores de carga en puntales durante la operación de descimbrado. También se ha escogido la operación de descimbrado del ensayo experimental como marco de referencia para el estudio.

- Efecto positivo de los limitadores de carga frente al colapso progresivo de las estructuras de edificios durante la construcción.

A partir de los estudios realizados se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Efecto positivo de los limitadores de carga durante la construcción de estructuras de edificios:
 - El modelo numérico del edificio experimental durante el desarrollo del ensayo ha quedado calibrado y validado mostrando elevados ajustes entre las medidas experimentales y los resultados obtenidos de los modelos numéricos.
 - La carga máxima del puntal más cargado durante el ensayo experimental se mantuvo en 18.4kN (17.7kN experimentalmente) cuando se utilizaron limitadores de carga de 16.0kN de carga límite. En cambio, en el caso de no haber utilizado limitadores de carga, la carga máxima recibida en el sistema de apuntalamiento hubiera alcanzado un valor de 22.1kN, significativamente superior que la carga máxima finalmente recibida. La reducción de carga introducida por los limitadores de carga fue consecuentemente del 17%.
 - Los puntales menos cargados, con cargas inferiores a la carga límite, presentan generalmente cargas idénticas para los casos con y sin limitadores de carga. Sin embargo, existen algunos puntales con cargas inferiores a la carga límite que presentan mayor carga con limitadores de carga que sin limitadores de carga. Esto ocurre porque los limitadores de carga han entrado en comportamiento plástico en otro punto del sistema de apuntalamiento, redistribuyendo la carga sobrante y aumentando la carga de los puntales vecinos. Cualquier puntal con cargas superiores a la carga límite de los limitadores de carga presenta una carga inferior para el caso con limitadores de carga respecto al caso sin limitadores de carga. Este efecto es un efecto directo del concepto de limitador de carga en puntales.
 - En todos los casos, tras la plastificación y actuación de los limitadores de carga, el desplazamiento de todos los puntos bajo la losa aumenta ligeramente respecto a la situación sin limitadores de carga. Este aumento del desplazamiento se debe a que parte de la carga redistribuida en cada puntal la asume el forjado. Este hecho no supone en ningún momento un efecto negativo para los forjados, porque el ligero aumento de la carga que estos deben asumir se realiza en operaciones constructivas en las que el sistema de apuntalamiento está más solicitado, y consecuentemente los forjados lo están menos. En otras operaciones constructivas los

forjados están mucho más solicitados, recibiendo cargas cercanas a sus cargas de diseño.

- Efecto positivo de los limitadores de carga en puntales durante la operación de descimbrado (descimbrando puntales desde los pilares hacia el centro de vano):
 - El modelo numérico utilizado quedo validado presentando un buen ajuste entre las medidas experimentales y los resultados obtenidos del modelo numérico.
 - Manteniendo las condiciones del ensayo experimental llevado a cabo, con el uso de limitadores de carga, la carga del puntal de centro de vano se mantuvo por debajo de los 21.6kN, mientras que, si no se hubieran instalado limitadores de carga, la carga hubiera alcanzado un valor de 32.2kN. La reducción de la carga máxima durante el descimbrado, debido al uso de limitadores de carga, fue por tanto del 33%.
 - Considerando una de las situaciones más desfavorable posible, la carga del puntal de centro de vano sin limitadores de carga hubiera alcanzado un valor de 46.8kN, produciendo con total seguridad la rotura del puntal. Con el uso de limitadores de carga, idénticos a los utilizados en el ensayo experimental, la carga del puntal de centro de vano se hubiera mantenido por debajo de los 32.6kN. Y si además se hubiera aumentado el máximo desplazamiento plástico efectivo de los limitadores de carga hasta los 3.5mm, la carga del puntal de centro de vano se hubiera mantenido por debajo de los 22.2kN, valor claramente inferior al valor de carga registrado en los anteriores casos. Con una altura del hueco de 4.0mm, el máximo desplazamiento plástico del limitador de carga no se hubiera agotado, y el limitador de carga durante el descimbrado hubiera cumplido su función perfectamente, manteniendo la carga de los puntales en un nivel reducido y evitando la rotura de los mismos. La reducción de la carga en este caso es muy notable. Respecto a la no utilización de limitadores de carga, la reducción de la carga máxima es de un 53%.
- Efecto positivo de los limitadores de carga frente al colapso progresivo de las estructuras de edificios durante la construcción:
 - En el estudio llevado a cabo se ha demostrado que con un sistema de apuntalamiento correctamente diseñado se evitaría el colapso de la estructura completa en situaciones accidentales. Sin embargo, en los escenarios de fallo más agresivos, cuando no se utilizan limitadores de carga en puntales, se produce el colapso progresivo del sistema de apuntalamiento, produciendo una fisuración extensa en los forjados y afectando gravemente a las condiciones de servicio

y durabilidad de la estructura. En estos casos sería necesario evaluar el daño de la estructura para analizar su seguridad y decidir si los forjados pueden ser reparados o necesitan ser demolidos.

- Si se utilizan limitadores de carga en los puntales se evitan todos estos problemas. Los limitadores de carga son capaces de mantener a los puntales trabajando a una carga límite cercana a su carga admisible, sin sobrepasarla ni producir el colapso de los puntales. Además, son capaces de mantener esta carga en el tiempo, incluso en aquellas situaciones en las que se intenta superarla. Esto permite que los puntales sigan operativos y cumplan su función de sustentación de los forjados de forma efectiva, sin producir fisuración en los forjados y manteniendo sus condiciones de servicio y durabilidad.
- El uso de limitadores de carga en puntales ha supuesto una medida de mitigación del riesgo de colapso progresivo del sistema de apuntalamiento muy efectiva.

Como se puede observar, tras los diferentes análisis numéricos realizados se han ampliado y demostrado objetivamente las ventajas del uso de limitadores de carga en puntales tratadas con anterioridad.

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES, APORTACIÓN ORIGINAL Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

7.1 Resumen y conclusiones

Uno de los principales resultados obtenidos en el desarrollo de la tesis es un nuevo dispositivo de control de carga en los puntales (limitador de carga; patente número ES2636833) que puede cambiar de forma drástica la construcción de estructuras mediante estructuras temporales de apuntalamiento y, de esta forma, presentar un nuevo enfoque al sector de la construcción a nivel internacional.

El estudio llevado a cabo se ha centrado en el caso de estructuras de edificios durante la construcción donde el limitador de carga pretende:

- Aumentar la seguridad durante la construcción para minimizar el número de fallos y colapsos ocurridos.
- Reducir los costes durante la construcción, tal y como las empresas de cimbras del sector han perseguido tradicionalmente con nuevos procesos constructivos como el clareado y el recimbrado.

En primer lugar, se analizó la viabilidad técnico-económica de los limitadores de carga mediante simulación numérica, como método preliminar de análisis de la validez del nuevo concepto. La viabilidad económica del uso de limitadores de carga quedó demostrada al permitir optimizar los costes de ejecución de los forjados, empleando sistemas de apuntalamiento que resistan cargas inferiores o con un número inferior de puntales. La viabilidad técnica, por su parte, también quedó demostrada desde diferentes puntos de vista:

- Un aumento de la seguridad al conseguir una redistribución de cargas máximas en puntales y, bajo condiciones controladas, sin producir fisuración en el forjado.
- Un aumento de la eficiencia estructural al permitir la redistribución de cargas máximas en puntales. Esta redistribución conlleva a un mayor aprovechamiento de la resistencia de cada uno de los puntales, y de parte de la resistencia no utilizada de los forjados.

Tras este primer análisis previo se pasó a la fase de diseño, fabricación, ensayo y simulación de limitadores de carga. Tras las primeras ideas conceptuales, el diseño de detalle quedó definido con ayuda de la simulación numérica y la técnica del

diseño de experimentos. Una vez alcanzados los distintos diseños definitivos se fabricaron y ensayaron distintos lotes de limitadores de carga, se calibraron los modelos numéricos y se presentó una metodología simplificada para su simulación, obteniendo las siguientes conclusiones:

- El limitador de carga con paredes verticales quedó descartado tras el primer lote de ensayos. Los resultados mostraron una elevada variabilidad, no cumpliéndose por tanto el requisito de repetitividad que se le exige a los limitadores de carga.
- Los limitadores de carga con tirante cumplen los requisitos marcados:
 - La rigidez inicial del tramo elástico es muy elevada. Consecuentemente, no se modifica la rigidez de un puntal en su rama elástica.
 - Presentan comportamiento plástico al alcanzar la carga límite prevista.
 - Son capaces de mantener la carga al valor de la carga límite o en valores ligeramente superiores mientras se agota el máximo desplazamiento plástico permitido.
 - Presentan un máximo desplazamiento plástico que limita el descenso máximo adicional permitido del elemento constructivo que sustentan los puntales (por ejemplo, los forjados).
 - Tras agotar el máximo desplazamiento plástico permitido son capaces de seguir aprovechando la resistencia residual del puntal hasta su punto de rotura.
 - La reutilización de los limitadores de carga ha quedado demostrada con los ensayos bajo cargas repetitivas, alcanzando, durante los ensayos, repeticiones de la carga de hasta 190 veces. Se recomienda la sustitución de los limitadores de carga si, bajo inspección visual, han superado la mitad del máximo desplazamiento plástico permitido. Si se ha realizado un diseño correcto, no se considera habitual alcanzar este nivel de daño. Por lo tanto, la sustitución de limitadores de carga solo se producirá en situaciones muy concretas en las que probablemente se hayan evitado fallos en la seguridad durante la construcción.
 - Previsiblemente, los limitadores fabricados en acero convencional tendrán un coste reducido, dentro de los límites establecidos.
- Los modelos numéricos quedaron calibrados obteniendo resultados idénticos en comparación con los obtenidos experimentalmente. Estos modelos pueden ser utilizados, por tanto, para prever con exactitud el comportamiento de los limitadores de carga bajo diferentes situaciones.
- Se propuso una metodología simplificada y genérica para establecer el comportamiento de puntales más limitadores de carga. Esta metodología puede ser utilizada, por ejemplo, en simulaciones numéricas macro-escala.

Una vez obtenido y validado el diseño de los limitadores de carga con un diseño a nivel prototipo o preindustrial, se realizó una prueba de concepto aplicando los limitadores de carga en un ensayo experimental para comprobar su correcto comportamiento bajo condiciones reales. Durante la realización de este ensayo experimental se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- El limitador de carga cumplió su función de limitar la carga de los puntales de forma eficaz.
- Se produjo, en mayor medida, un aprovechamiento de la capacidad resistente de todos los puntales utilizados. Es decir, una mayor cantidad de puntales trabajan a una carga similar (y menor a la carga máxima que hubieran registrado sin limitadores de carga), aprovechando la capacidad resistente del conjunto de puntales.
- Se utilizaron puntales con capacidades resistentes inferiores a las requeridas si no se hubieran empleado limitadores de carga, lo que directamente se traduce en puntales más económicos.
- Los momentos registrados en puntales durante la ejecución del ensayo experimental fueron elevados, incluso con un control exhaustivo de la verticalidad de los puntales en su instalación. La excentricidad de la carga medida fue elevada, llegando a registrar deformaciones de tracción en algunos puntos de las secciones de las bases de los puntales. El uso de limitadores de carga no empeoró esta situación. De hecho, se registraron ligeros efectos favorables en el uso de los limitadores de carga que redujeron la magnitud del momento registrado en los puntales. Este efecto positivo hubiera sido todavía más pronunciado si el ensayo no se hubiera realizado en condiciones controladas en un laboratorio, donde se controló exhaustivamente la verticalidad de los puntales.
- Se observó que, aunque el descimbrado se realice de forma inversa a la generalmente recomendada, ningún puntal se sobrecargó debido a la limitación de la carga máxima de los limitadores de carga. Estos limitadores de carga mantuvieron la carga de los puntales por debajo de los 19.0kN hasta agotar el máximo desplazamiento plástico permitido, momento en el que la carga máxima alcanzó los 21.4kN.
- Quedó demostrado el buen comportamiento y la posible reutilización de los limitadores de carga bajo condiciones reales. Todas las ventajas son realmente importantes para la industria con el objetivo de mejorar los procesos constructivos desde todos los puntos de vista: economía, seguridad, calidad y eficiencia.

Finalmente, tras la prueba de concepto realizada en el ensayo experimental con el uso de limitadores de carga en puntales, se realizaron diferentes estudios a nivel numérico con modelos calibrados y validados que pretendían incidir en los efectos positivos del limitador de carga. Estos estudios numéricos se centraron en los casos del ensayo experimental y de la construcción de otra estructura de edificio. En ambos casos se analizaron diferentes aspectos sobre qué hubiera pasado con y sin el uso de limitadores de carga en puntales. De los resultados obtenidos se puede concluir:

- Un claro efecto positivo de los limitadores de carga durante la construcción de estructuras de edificios, que se resume en las siguientes conclusiones:
 - La reducción de carga introducida por los limitadores de carga durante el ensayo experimental fue del 17%, obteniendo una carga de 22.1kN y de 18.4kN sin y con el uso de limitadores de carga en puntales de 16.0kN de carga límite, respectivamente.
 - Los puntales menos cargados, con cargas inferiores a la carga límite, presentan generalmente cargas idénticas para los casos con y sin limitadores de carga, aunque existen algunos puntales que presentan mayor carga con el uso de limitadores de carga. Esto ocurre porque los limitadores de carga de algunos puntales han entrado en comportamiento plástico en otro punto del sistema de apuntalamiento, redistribuyendo la carga sobrante y aumentando la carga de los puntales vecinos. Cualquier puntal con cargas superiores a la carga límite de los limitadores de carga presenta una carga inferior para el caso con limitadores de carga respecto al caso sin limitadores de carga.
 - En todos los casos, tras la plastificación y actuación de los limitadores de carga, el desplazamiento de todos los puntos bajo el forjado del ensayo experimental aumenta ligeramente respecto a la situación sin limitadores de carga. Este aumento del desplazamiento se debe a que parte de la carga redistribuida en cada puntal la asume el forjado. Este hecho no supone en ningún momento un efecto negativo para los forjados, porque el ligero aumento de la carga que estos deben asumir se realiza en operaciones constructivas en las que el sistema de apuntalamiento está más solicitado, y consecuentemente los forjados lo están menos. En otras operaciones constructivas los forjados están mucho más solicitados, recibiendo cargas cercanas a sus cargas de diseño.
- Un claro efecto positivo de los limitadores de carga en puntales durante la operación de descimbrado (descimbrando puntales desde los pilares hacia el centro de vano), que se resume en las siguientes conclusiones:
 - Manteniendo las condiciones del ensayo experimental llevado a cabo con el uso de limitadores de carga, la carga del puntal de centro de vano se mantuvo por debajo de los 21.6kN, mientras que, si no

se hubieran instalado limitadores de carga, la carga hubiera alcanzado un valor de 32.2kN. La reducción de la carga máxima durante el descimbrado, debido al uso de limitadores de carga, fue por tanto del 33%.

- Considerando una de las situaciones más desfavorable, la carga del puntal de centro de vano sin limitadores de carga hubiera alcanzado un valor de 46.8kN. Con el uso de limitadores de carga, idénticos a los utilizados en el ensayo experimental, la carga del puntal de centro de vano se hubiera mantenido por debajo de los 32.6kN. Y si además se hubiera aumentado el máximo desplazamiento plástico efectivo de los limitadores de carga hasta los 3.5mm, la carga del puntal de centro de vano se hubiera mantenido por debajo de los 22.2kN, valor claramente inferior al valor de carga registrado en los anteriores casos. La reducción de la carga en este caso es muy notable. Respecto a la no utilización de limitadores de carga, la reducción de la carga máxima es de un 53%.
- Un claro efecto positivo de los limitadores de carga frente al colapso progresivo de las estructuras de edificios durante la construcción, que se resume en las siguientes conclusiones:
 - Un sistema de apuntalamiento correctamente diseñado evitaría el colapso progresivo de la estructura completa en situaciones accidentales. Sin embargo, en los escenarios de fallo más agresivos, cuando no se utilizan limitadores de carga en puntales, se produce el colapso progresivo del sistema de apuntalamiento, produciendo una fisuración extendida en los forjados y afectando gravemente a las condiciones de servicio y durabilidad de la estructura. En estos casos sería necesario evaluar el daño de la estructura para analizar su seguridad y decidir si los forjados pueden ser reparados o necesitan ser demolidos.
 - Si se utilizan limitadores de carga en los puntales se evitan todos estos problemas. Los limitadores de carga son capaces de mantener a los puntales trabajando a una carga límite cercana a su carga admisible, sin sobrepasarla ni producir el colapso de los puntales. Además, son capaces de mantener esta carga en el tiempo, incluso en aquellas situaciones en las que se intenta superarla. Esto permite que los puntales sigan operativos y cumplan su función de sustentación de los forjados de forma efectiva, sin producir fisuración en los forjados y manteniendo sus condiciones de servicio y durabilidad.
 - El uso de limitadores de carga en puntales ha supuesto una medida de mitigación del riesgo de colapso progresivo del sistema de apuntalamiento muy efectiva. Por lo tanto, con el uso de limitadores

de carga se gana en seguridad frente a acciones imprevistas y/o accidentales como, por ejemplo: fallo de un puntal, sobrecargas inesperadas, acciones humanas, etc.

7.2. Aportación original

El completo análisis realizado ha demostrado objetivamente las múltiples ventajas y la viabilidad técnica del uso de los limitadores de carga en puntales desarrollados en esta tesis doctoral. En comparación a los desarrollos identificados con anterioridad en el Capítulo 2, el limitador de carga en puntales desarrollado en esta tesis doctoral supone una novedad indiscutible, que introduce un control exhaustivo de la carga de los puntales antes y después de alcanzar la carga límite de los limitadores. Este comportamiento difiere sustancialmente de sus predecesores (elementos cuya rotura supone exclusivamente un método de indicación de la carga límite y elementos para descimbrado rápido y sencillo de puntales) en:

- El principal objetivo es controlar la carga de forma exhaustiva tras alcanzar la carga límite, manteniendo los puntales operativos.
- No se produce una descarga repentina de los puntales.
- Limita el máximo desplazamiento plástico permitido a un valor elegible, acotando la máxima deformación admisible de los elementos constructivos que sostienen los puntales.
- Incrementa la seguridad y la eficiencia estructural. Ninguno de los desarrollos anteriormente propuestos mejora los graves problemas de seguridad, que se traducen en colapsos incluso de estructuras completas en algunos casos, y en graves problemas para las condiciones de servicio de la estructura y su durabilidad en otros. Como se ha analizado, estos problemas vienen ocasionados por diferentes causas, siendo las cargas en puntales superiores a la admisible la causa más común, y el colapso repentino de estos puntales el desencadenante de los problemas.
- Reduce los costes asociados al sistema de apuntalamiento permitiendo el uso de puntales con menores capacidades resistentes, e incluso un número inferior de puntales.
- No solo es un dispositivo de información, sino que además actúa en tiempo real, con un control exhaustivo de la carga que recibe un puntal y con el objetivo de no superar la carga límite definida y mantener los puntales operativos a la carga deseada. Consecuentemente, el desarrollo propuesto en esta tesis doctoral no solo avisa de que los puntales están o han trabajado a su carga límite, sino que además actúan en tiempo real para reducir el riesgo de fallo del sistema de apuntalamiento y el posible colapso progresivo de toda la estructura. De lo contrario, si tan solo fuera un sistema de información, que además descarga los puntales de forma repentina, tan solo avisaría del incorrecto funcionamiento de los puntales manteniéndolos

inoperativos, empeorando incluso todavía más la situación en caso de fallo global del sistema de apuntalamiento e incluso de la estructura completa.

- Presenta un sistema de instalación que no necesita dismantelar el puntal para instalar o sustituir los limitadores de carga.
- Como uno de los desarrollos anteriores, también evita reparar o sustituir puntales. La única pieza a sustituir, si se agota el máximo desplazamiento plástico permitido, es el limitador de carga. El puntal quedaría en perfecto estado.

Adicionalmente, el desarrollo de la presente tesis doctoral proporciona, tanto a la comunidad científica como a ingenieros y arquitectos, un nuevo conocimiento sobre cómo puede modificarse la transmisión de cargas entre forjados y puntales con la introducción de los limitadores de carga. La redistribución de cargas en el sistema de apuntalamiento, permitida y controlada por el nuevo dispositivo, abre la puerta a nuevos horizontes, hasta la fecha desconocidos, en los que entra en juego una nueva variable que permite ir más allá de la frontera del conocimiento y alcanzar soluciones más seguras, más económicas, más eficientes y con acabados de mayor calidad.

7.3. Futuras líneas de investigación

Tras los diferentes trabajos realizados en el marco de la presente tesis doctoral se proponen a continuación algunas líneas de investigación que se sugieren y recomiendan como continuación del estudio y desarrollo realizado:

- Desarrollo de un método simplificado de cálculo para la consideración de los limitadores de carga en la transmisión de cargas entre forjados y puntales. Es de vital importancia el desarrollo de un nuevo método simplificado que permita a empresas de cimbras, constructoras y técnicos del sector (ingenieros y arquitectos) disponer de una herramienta de cálculo simplificada y sencilla, que fomente su aplicación práctica e introducción en el mercado.
- Empleo de los limitadores de carga en otras técnicas de cimbrado y otro tipo de estructuras temporales de cimbrado, como por ejemplo aquellas utilizadas para la construcción de puentes.
- Análisis en profundidad de las implicaciones de los diferentes procesos constructivos, incluyendo limitadores de carga en puntales, en el comportamiento a largo plazo de la estructura, en el que la fluencia y el historial de cargas de la estructura permanente a edades jóvenes juega un papel fundamental.
- Conseguir un consenso a nivel internacional sobre qué cargas y factores de seguridad deben considerarse durante la construcción de estructuras de edificios. Tanto los estudios recopilados como las normas a nivel internacional presentan actualmente criterios muy dispares que deberían ser

unificados. La correcta consideración de las acciones durante la construcción es muy importante para realizar un diseño correcto de la estructura temporal y de la permanente durante la construcción.

- Estudio y desarrollo de una herramienta que permita definir, de forma automática, procesos constructivos óptimos en términos de seguridad, coste y eficiencia, considerando incluso los limitadores de carga en puntales.

CHAPTER 7. CONCLUSIONS, NOVELTY AND FUTURE LINES OF RESEARCH

7.1 Summary and conclusions

One of the main results of this work is a new load control device to be installed on shores (load limited; patent number ES2636833). This new device might drastically change the construction of structures by temporary shoring systems and, in this way, presenting a new approach to the construction field at an international level.

The study was focused on the case of building structures during construction where the load limiter pretends:

- Increase safety during construction to minimize the number of failures and collapses that occurred historically.
- Reduce costs during construction, as specialized companies have traditionally pursued with new construction processes such as clearing and re-shoring.

First, the technical-economic viability of load limiters was analyzed by means of numerical simulation, as a preliminary study of analyzing the validity of the new concept. On the one hand, the economic viability of using load limiters was demonstrated by optimizing the execution costs of the structure, using shoring systems that withstand lower loads or with a lower number of shores. The technical viability, on the other hand, was also demonstrated from different points of view:

- A safety increase because it is achieved a redistribution of maximum loads on shores and, under controlled conditions, without causing cracking in slabs.
- A structural efficiency increase because of the redistribution of maximum loads on shores. This redistribution take advantage of the strength of each shore, and part of the unused resistance of the slabs.

After this first preliminary analysis, the design, manufacturing, testing and simulation of load limiters was carried out. After the first conceptual ideas, the detailed design was performed with the help of numerical simulation and the design of experiments (DOE) technique. Once different designs were defined, different lots of load limiters were manufactured and tested, numerical models were calibrated and a simplified methodology for their simulation was presented, obtaining the following conclusions:

- The confined load limiters were discarded after the first lot of tests. The results showed wide variations, therefore not fulfilling the requirement of repeatability that is required for the load limiters.
- The load limiters with tie rods complied with the desired requirements:
 - Initial stiffness is very high. Consequently, the stiffness of a shore in its elastic behavior is not modified.
 - They exhibit plastic behavior when reaching the expected limit load.
 - They are capable of maintaining the load at the value of the limit load or at a value slightly higher, until reaching the maximum allowed plastic displacement.
 - Their maximum plastic displacement limits the vertical displacement of the structural element they support, e.g. slabs.
 - After reaching maximum plastic displacement they can make use of the shore's resistance up to its ultimate load.
 - The 190 consecutive repetitive loading tests showed that they can be used repeatedly, although it is recommended to replace them after reaching half of their maximum allowed plastic displacement. If a correct design has been carried out, it is not considered usual to achieve this level of damage. Therefore, the replacement of load limiters will only occur in very specific situations where safety failures during construction have probably been avoided.
 - Predictably, the load limiters manufactured in conventional steel will have a reduced cost, within the established limits.
- The identical results obtained between experimental tests and numerical simulations validated the numerical models and showed that the latter can be used to accurately predict load limiters behavior in different situations.
- A simplified generic methodology was proposed to establish the behavior of the shore-LL unit that could also be used e.g. for macro-scale numerical simulations.

Once a prototype or pre-industrial design of the load limiters was obtained and validated, a proof of concept was carried out applying the load limiters in an experimental test with the aim of verifying their correct behavior under real conditions. The following conclusions were obtained during the realization of this experimental test:

- The load limiter fulfilled its function of limiting the load of the shores.
- There was a greater use of the resistant capacity of all the shores used. That is, a greater number of shores worked at a similar load (and less than the maximum load they would have registered without load limiters), taking advantage of the resistant capacity of all shores.
- Shores with less resistant capacities were used than those required if load limiters had not been used, which directly involves cheaper shores.

- The bending moments recorded in shores during the execution of the experimental test were high, even with an exhaustive control of the verticality of the shores in their installation. The eccentricity of the measured load was high, registering tensile deformations in some points of shore sections. The use of load limiters did not make this situation worse. In fact, there were slight favorable effects in the use of the load limiters that reduced the magnitude of the bending moment of shores. This positive effect would have been even more pronounced if the test had not been carried out under controlled conditions (e.g. in a laboratory), where the verticality of the shores was exhaustively controlled.
- Although the striking operation was performed in a reverse way to the generally recommended, no shore was overloaded due to the limitation of the maximum load of the load limiters. These load limiters kept the load of shores below 19kN until the maximum allowed plastic displacement was achieved, at which time the maximum load reached 21.4kN.
- The good behavior and the possible reuse of the load limiters under real conditions was also demonstrated. All the advantages are really important for the industry with the aim of improving the construction processes from all points of view: economy, safety, quality and efficiency.

Finally, after the proof of concept carried out in the experimental test with the use of load limiters on shores, different studies were performed with calibrated and validated numerical models that aimed to deeply study some of the positive effects of the load limiters. These numerical studies focused on the cases of the experimental test and the construction of another building structure. In both cases, different aspects of what would have happened with and without the use of load limiters on shores were analyzed. From the results obtained it can be concluded:

- A clear positive effect of the use of load limiters during the construction of building structures, which is summarized in the following conclusions:
 - The load reduction introduced by load limiters during the experimental test was 17%, obtaining a load of 22.1kN and 18.44kN without and with the use of load limiters of 16.0kN of limit load, respectively.
 - The less loaded shores, with loads lower than the limit load, generally presented identical loads for cases with and without load limiters, although there were some shores that presented greater load with the use of load limiters. This occurs because the load limiters of some shores had plastic behavior at another point of the shoring system, redistributing the excess load and increasing the load of the neighboring shores. Any shore with loads above the limit load of the load limiters has a lower load for the case with load limiters with respect to the case without load limiters.

- In all cases, after yielding of load limiters, the slab displacement in the experimental test increased slightly with respect to the situation without load limiters. This increase in displacement was due to the fact that part of the load redistributed in each shore is borne by the slab. This fact does not suppose a negative effect for slabs at any time, because the slight increase of the load that these must bear is done in construction stages in which the shoring system is more loaded, and consequently the slabs are less. In other construction stages, slabs are much more loaded, receiving loads close to their design loads.
- A clear positive effect of the load limiters on shores during the striking operation (removing shores from the columns towards the center of span), which is summarized in the following conclusions:
 - With the conditions of the experimental test carried out, the shore load located in the center of the bay remained below 21.6kN, while, if no load limiters had been installed, the load would have reached a value of 32.2kN. The reduction of the maximum load during the striking operation, due to the use of load limiters, was therefore 33%.
 - Considering one of the most unfavorable situations, the shore load located in the center of the bay without load limiters would have reached a value of 46.8kN. With the use of load limiters, identical to those used in the experimental test, the shore load located in the center of the bay would have remained below 32.6kN. In addition, if the maximum effective plastic displacement of the load limiters had been increased up to 3.5mm, the shore load located in the center of the bay would have remained below 22.2kN, which is a value clearly lower. The load reduction in this case was very remarkable. Regarding the non-use of load limiters, the reduction of the maximum load was 53%.
- A clear positive effect of load limiters against the progressive collapse of building structures during construction, which is summarized in the following conclusions:
 - A properly designed shoring system would have prevented the progressive collapse of the entire structure in accidental situations. However, in the most aggressive failure scenarios, when no load limiters were used on shores, the progressive collapse of the shoring system occurred, producing an extended crack in the slabs and seriously affecting the serviceability and durability conditions of the structure. In these cases it would be necessary to evaluate the damage of the structure to analyze its safety and decide if the slabs can be repaired or need to be demolished.

- All these problems can be avoided using load limiters on shores. The load limiters are able to keep the shores working at a limit load close to their allowable load, without exceeding it or producing their sudden collapse. In addition, they are able to maintain this load over time, even in those situations in which they try to overcome it. This allows the shores to remain operative and perform their function of bearing the slabs effectively, without causing cracking in the slabs and maintaining their serviceability conditions and durability.
- The use of load limiters on shores is a very effective measure of risk mitigation of progressive collapse of the shoring system. Safety against unexpected and/or accidental actions, such as failure of a shore, unexpected overloads, human actions, etc., was also increased.

7.2. Novelty

The complete analysis carried out has objectively demonstrated the multiple advantages and the technical viability of the use of load limiters on shores. Compared to the developments previously identified in Chapter 2, the load limiter on shores developed in this work has an indisputable novelty, which introduces an exhaustive control of the load of shores before and after reaching the limit load of the load limiters. This behavior differs substantially from its predecessors (elements whose breaking involves only a method of indicating the limit load, and elements for quick and simple striking of shores) in:

- The main objective is to control the load exhaustively after reaching the limit load, keeping the shores installed in an operational way.
- There is no sudden unload of the shores.
- The developed load limiter limits the maximum allowed plastic displacement to an eligible value, limiting the maximum admissible deformation of the constructive elements that shores support.
- The load limiters increase safety and structural efficiency. None of the previously proposed developments improves the serious safety problems, which result in collapses even of complete structures, in some cases, and in serious problems for the serviceability conditions of the structure and its durability, in others. As it has been analyzed, these problems are caused by different causes, being the loads on shores greater than the admissible load the most common cause, and the sudden collapse of these shores the trigger of the problems.
- The use of load limiters on shores reduces the costs associated with the shoring system by allowing the use of shores with lower resistant capacities, and even a lower number of shores.

- It is not only an information device, but also acts in real time, with an exhaustive control of the load received by a shore and with the objective of not exceeding the defined limit load and maintaining the shores working at the desired load. Consequently, the proposed development in this work not only warns that shores have worked at their limit load, but also acts in real time to reduce the risk to failure of the shoring system and the possible progressive collapse of the entire structure. Otherwise, if it only was an information system, as the predecessors, which also unloaded shores suddenly, it would only warn of the incorrect operation of the shores keeping them inoperative, worsening even more the situation in case of global failure of the shoring system and even of the complete structure.
- It has an installation system that does not need to disassemble the shores to install or replace the load limiters.
- As one of the predecessors, it also avoids repairing or replacing shores. The only part to be replaced, if the maximum allowed plastic displacement is reached, is the load limiter. The shore should be in perfect conditions.

Additionally, the development of the present doctoral thesis provides both the scientific community and engineers and architects with new knowledge on how the load transmission between slabs and shores can be modified by means of load limiters. The load redistribution in the shoring system, controlled by the new device, opens new horizons, still unknown, in which a new variable comes into play that allows going beyond the frontier of knowledge to achieve safer, more economical and more efficient solutions.

7.3. Future lines of research

After the different studies and developments carried out in this work, some lines of research are proposed below that are suggested and recommended as a continuation of the study and development carried out:

- Development of a simplified calculation method for the consideration of load limiters in the transmission of loads between slabs and shores. It is of vital importance the development of a new simplified method that allows practitioners, companies and constructors of the field to have a simplified and simple calculation tool, which encourages its practical application and introduction of load limiters into the market.
- Use of load limiters in other shoring construction processes and other temporary shoring structures, such as those used for bridge construction.
- In-depth analysis of the influence of the different construction processes, including load limiters on shores, in the long-term behavior of the structure, in which the creep and load history of the permanent structure at young ages plays a fundamental role.

- To achieve an international consensus on what loads and safety factors should be considered during the construction of building structures. Both, the studies compiled and the international standards, currently present very different criteria that should be unified. The correct consideration of the actions during the construction is very important to make a correct design of the temporary and the permanent structure during the construction.
- Study and development of a tool that allows to define, automatically, optimal constructive processes in terms of safety, cost and efficiency; considering even the load limiters installed on shores.

REFERENCIAS

- [1] Carper KL. Structural Failures During Construction. *J Perform Constr Facil* 1987;1:132–144. doi:10.1061/(ASCE)0887-3828(1987)1:3(132).
- [2] Hadipriono FC, Wang H-K. Causes of falsework collapses during construction. *Struct Saf* 1987;4:179–195. doi:10.1016/0167-4730(87)90012-9.
- [3] Epaarachchi DC, Stewart MG, Rosowsky D V. Structural Reliability of Multistory Buildings during Construction. *J Struct Eng* 2002;128:205–213. doi:10.1061/(ASCE)0733-9445(2002)128:2(205).
- [4] Kaminetzky D V., Stivaros PC. Early-Age Concrete: Construction Loads, Behavior, and Failures. *Concr Int* 1994;16:58–63.
- [5] Terwel K, Mud M, Frijters A. Structural safety during construction. *IABSE Madrid Symp Eng Progress, Nat People* 2014;102:1071–1078. doi:10.2749/222137814814067248.
- [6] Calderón PA, Alvarado YA, Adam JM. A new simplified procedure to estimate loads on slabs and shoring during the construction of multistorey buildings. *Eng Struct* 2011;33:1565–1575. doi:10.1016/j.engstruct.2011.01.027.
- [7] Buitrago M, Adam JM, Alvarado YA, Calderón PA, Gasch I. Maximum loads on shores during the construction of buildings. *Proc Inst Civ Eng - Struct Build* 2016;169:538–545. doi:10.1680/jstbu.15.00089.
- [8] Buitrago M, Adam JM, Calderón PA, Alvarado YA, Moragues JJ. Estimating loads on shores during the construction of RC building structures. *Struct Concr* 2016;17:502–512. doi:10.1002/suco.201500130.
- [9] Kaminetzky D. Structural Failures and How to Prevent Them. *Civ Eng* 1976;46:60–73.
- [10] Hauser R. Lessons from european failures. *Concr Int* 1979;1:21–5.
- [11] Fitzsimons N, Vannoy D. Establishing patterns of building failures. *Civ Eng New York* 1984;54:54–67.
- [12] Buitrago M, Moragues JJ, Calderón PA, Adam JM. Structural failures in cast-in-place RC building structures under construction. In: Makhoulf ASH, Aliofkhazraei M, editors. *Handb. Mater. Fail. Anal. with Case Stud. from Constr. Ind.* Vol. 6. 1st ed, Butterworth-Heinemann, Elsevier; 2018, p. 560. doi:10.1016/B978-0-08-101928-3.00008-2.

- [13] Buitrago M, Sagaseta J, Adam JM. Effects of sudden failure of shoring elements in concrete building structures under construction. *Eng Struct* 2018;172:508-522. doi: 10.1016/j.engstruct.2018.06.052.
- [14] Buitrago M, Adam JM, Calderón PA, Moragues JJ. Modelling of RC structures during construction. In: Barros H, Ferreira C, Adam JM, Delatte N, editors. 2nd Int. Conf. Recent Adv. Nonlinear Model. – Des. Rehabil. Struct., Coimbra: 2017, p. 53–62.
- [15] EN 1065. Adjustable telescopic steel props. Product specifications, design and assessment by calculation and tests 1998.
- [16] Alsina Formwork Solutions 2018. <http://www.alsina.com/>.
- [17] Feld J. Building failures: floor support shoring in multi-storey construction. *Build Res Pract* 1974;2:151–165. doi:10.1080/09613217408550309.
- [18] Eldukair ZA, Ayyub BM. Analysis of Recent U.S. Structural and Construction Failures. *J Perform Constr Facil* 1991;5:57–73. doi:10.1061/(ASCE)0887-3828(1991)5:1(57).
- [19] Khudeira S. Building Collapse during Construction. *Pract Period Struct Des Constr* 2010;15:99–100. doi:10.1061/(ASCE)SC.1943-5576.0000058.
- [20] Freyermuth CL. Structural integrity of buildings constructed with unbonded tendons. *Concr Int* 1989;11:56–63.
- [21] Karshenas S, Ayoub H. Construction live loads on slab formworks before concrete placement. *Struct Saf* 1994;14:155–172. doi:10.1016/0167-4730(94)90082-5.
- [22] Karshenas S, Ayoub H. Analysis of Concrete Construction Live Loads on Newly Poured Slabs. *J Struct Eng* 1994;120:1525–1542.
- [23] Rosowsky D V., Huang YL, Chen WF, Yen T. Modeling concrete placement loads during construction. *Struct Eng Rev* 1994;6:71–84.
- [24] Kothekar A V., Rosowsky D V., Huston DR. Investigating the Adequacy of Vertical Design Loads for Shoring. *J Perform Constr Facil* 1998;12:41–47. doi:10.1061/(ASCE)0887-3828(1998)12:1(41).
- [25] Rosowsky D V., Stewart MG. Probabilistic Construction Load Model for Multistory Reinforced-Concrete Buildings. *J Perform Constr Facil* 2001;15:145–152. doi:10.1061/(ASCE)0887-3828(2001)15:4(145).
- [26] Zhang CM, Fang DP, Geng CD, Wang X. In situ investigation and statistical analysis of live loads of reinforced concrete buildings during construction. *Gongcheng Lixue/Engineering Mech* 2002;19:62–66.
- [27] Peng JL, Chan SL, Wu CL. Effects of geometrical shape and incremental

- loads on scaffold systems. *J Constr Steel Res* 2007;63:448–459. doi:10.1016/j.jcsr.2006.07.006.
- [28] Zhao N, Hu CM, Yan W. Research and Statistic Analysis on Construction Loads of Multistory Frame R.C Buildings. *Adv Mater Res* 2011;368–373:1531–4. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.368-373.1531.
- [29] Xie N, Liang RZ, Hu H. Analysis of construction loads on formwork during concrete placement based on influence surface. *Gongcheng Lixue/Engineering Mech* 2011;28:173–178.
- [30] Xie N, Liu B. Influence surfaces of construction live load effects and application. *Jianzhu Jiegou Xuebao/Journal Build Struct* 2012;33:136–41.
- [31] Xie N, Zhang J, Zhang L, Fu XH, Zhang QH. Surveys and statistical analyses of construction loads during concrete placement based on influence surface. *Gongcheng Lixue/Engineering Mech* 2015;32:90–96. doi:10.6052/j.issn.1000-4750.2013.08.0729.
- [32] Zhang H, Reynolds J, Rasmussen KJR, Ellingwood BR. Reliability-Based Load Requirements for Formwork Shores during Concrete Placement. *J Struct Eng* 2016;142:1–9. doi:10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001362.
- [33] Standards ASCE/SEI 37-02. Design loads on structures during construction 2002.
- [34] EN 1991-1-6. Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-6: General actions - Actions during execution 2005.
- [35] AS 3610. Australian standard formwork for concrete 2010.
- [36] ACI 347-04. Guide to Formwork for Concrete. ACI Committee; 2004.
- [37] Webster FA. Reliability of multistory slab structures against progressive collapse during construction. *J Am Concr Inst* 1980;77:449–457.
- [38] Ellingwood B. Design and construction error effects on structural reliability. *J Struct Eng* 1987;113:409–422.
- [39] Mosallam KH, Chen W-F. Design considerations for formwork in multistorey concrete buildings. *Constr Build Mater* 1992;6:23–30. doi:10.1016/0950-0618(92)90024-S.
- [40] Epaarachchi DC, Stewart MG. Human Error and Reliability of Multistory Reinforced-Concrete Building Construction. *J Perform Constr Facil* 2004;18:12–20. doi:10.1061/(ASCE)0887-3828(2004)18:1(12).
- [41] Fang D, Geng C, Zhang C, Zhu H, Liu X. Reliability of reinforced concrete buildings during construction. *Tsinghua Sci Technol* 2004;9:710–716.

- [42] Yuan XX, Jin WL. Structural Reliability and Human Error of Reinforced-Concrete Building during Construction. *Adv Mater Res* 2011;368–373:1365–9. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.368-373.1365.
- [43] Zhang H, Rasmussen KJR, Ellingwood BR. Reliability assessment of steel scaffold shoring structures for concrete formwork. *Eng Struct* 2012;36:81–89. doi:10.1016/j.engstruct.2011.11.027.
- [44] Rubio-Romero JC, Carmen Rubio Gámez M, Carrillo-Castrillo JA. Analysis of the safety conditions of scaffolding on construction sites. *Saf Sci* 2013;55:160–164. doi:10.1016/j.ssci.2013.01.006.
- [45] Buitrago M, Alvarado YA, Adam JM, Calderón PC, Gasch I, Moragues JJ. Improving construction processes of concrete building structures using load limiters on shores. *Eng Struct* 2015;100:104–115. doi:10.1016/j.engstruct.2015.06.007.
- [46] Di Palma D. Measures to minimize the risk of progressive collapse of reinforced concrete building structures during construction. Application at buildings with flat slabs. Polytechnic University of Valencia, 2017. doi:http://hdl.handle.net/10251/78147.
- [47] Nielsen K. Loads on reinforced concrete floor slabs and their deformations during construction. Final Report, 15 1952.
- [48] Grundy P, Kabaila A. Construction Loads on Slabs with Shored Formwork in Multistory Buildings. *J Proc* 1963;60:1729–1738.
- [49] Liu X la, Chen WF, Bowman MD. Construction Load Analysis for Concrete Structures. *J Struct Eng* 1985;111:1019–1036. doi:10.1061/(ASCE)0733-9445(1985)111:5(1019).
- [50] Stivaros PC, Halvorsen GT. Shoring/Reshoring Operations for Multistory Buildings. *Struct J* 1990;87:589–596.
- [51] Mosallam KH, Chen W-F. Determining Shoring Loads for Reinforced Concrete Construction. *Struct J* 1991;88:340–350.
- [52] Duan MZ, Chen WF. Improved simplified method for slab and shore load analysis during construction. *Proj Rep CE-STR-95-21* 1995.
- [53] Moragues JJ, Catala J, Pellicer E. An Analysis Of concrete Framed Structures During The Construction Process. *Concr Int* 1996;18:44–48.
- [54] Beeby AW. The forces in backprops during construction of flat slab structures. *Struct Build* 2001;146:307–317. doi:10.1680/stbu.146.3.307.45438.
- [55] Fang DP, Zhu HY, Geng CD, Liu X La. On-site measurement of load

- distribution in reinforced concrete buildings during construction. *ACI Struct J* 2001;98:157–163.
- [56] Alvarado YA, Calderón PA, Adam JM, Payá-Zaforteza IJ, Pellicer TM, Pallarés FJ, et al. An experimental study into the evolution of loads on shores and slabs during construction of multistory buildings using partial striking. *Eng Struct* 2009;31:2132–2140. doi:10.1016/j.engstruct.2009.03.021.
- [57] Taylor P. Effects of formwork stripping time on deflections of flat slabs and plates. *Aust Civ Eng Constr* 1967;8:31–35.
- [58] Liu XL, Chen WF, Bowman MD. Shore-Slab Interaction in Concrete Buildings. *J Constr Eng Manag* 1986;112:227–244. doi:10.1061/(ASCE)0733-9364(1986)112:2(227).
- [59] Aguinaga-Zapata M, Bazant Z. Creep Deflections in Slab Buildings and forces in shores during construction. *ACI J* 1986;83:719–726.
- [60] El-Shahhat AM, Chen W-F. Improved Analysis of Shore-Slab Interaction. *Struct J* 1992;89:528–37.
- [61] Fang DP, Geng CD, Zhu HY, Liu X La. Floor load distribution in reinforced concrete buildings during construction. *ACI Struct J* 2001;98:149–156.
- [62] Fang D, Xi H, Wang X, Zhang C, Zhao T. Load distribution assessment of reinforced concrete buildings during construction with structural characteristic parameter approach. *Tsinghua Sci Technol* 2009;14:746–755. doi:10.1016/S1007-0214(09)70145-2.
- [63] Almeida-Prado JFM, Corrêa MRS, Ramalho MA. A new procedure for the analysis of construction loads in multistory reinforced concrete structures. *Struct Des Tall Spec Build* 2003;12:293–315. doi:10.1002/tal.223.
- [64] Kajewski SL. Multilevel Formwork Load Distribution with Posttensioned Slabs. *J Constr Eng Manag* 2005;131:203–210. doi:10.1061/(ASCE)0733-9364(2005)131:2(203).
- [65] Park HG, Hwang HJ, Hong GH, Kim YN, Kim JY. Slab construction load affected by shore stiffness and concrete cracking. *ACI Struct J* 2011;108:679–688. doi:10.14359/51683366.
- [66] Scanlon A, Murray DW. Practical Calculation of Two-Way Slab Deflections. *Concr Int* 1982;4:43–50.
- [67] Buitrago M, Adam JM, Alvarado YA, Moragues JJ, Gasch I, Calderón PA. Designing construction processes in buildings by heuristic optimization. *Eng Struct* 2016;111:1–10. doi:10.1016/j.engstruct.2015.12.009.
- [68] Buitrago M, Adam JM, Calderón PA, Moragues JJ. Automatic design of

- building construction processes by simulated annealing. A measure to improve sustainability, time, financial and computational costs. Proc. Second Int. Conf. Concr. Sustain. (ICCS 16), Madrid: 2016, p. 191–202.
- [69] Agarwal R, Gardner NJ. Form and Shore Requirements for Multi-Story Flat Slab Type Buildings . J Proc 1974;71:559–569.
- [70] Lasisi M, Ng S. Construction loads imposed on high-rise floor slabs. Concr Int Des Constr ACI 1979;1:24–29.
- [71] Ambrose TP, Houston DR, Fuhr PL, Devino EA, Werner MP. Shoring systems for construction load monitoring. Smart Mater Struct 1994;3:26–34. doi:10.1088/0964-1726/3/1/005.
- [72] Moragues JJ, Catalá J, Pellicer E. Mediciones en obra y análisis teórico de estructuras de edificación, de hormigón armado, durante el proceso de cimbrado consecutivo de forjados. Hormigón y acero 1994;190:83–91.
- [73] Rosowsky D V., Philbrick TW, Huston DR. Observations from Shore Load Measurements during Concrete Construction. J Perform Constr Facil 1997;11:18–23. doi:10.1061/(ASCE)0887-3828(1997)11:1(18).
- [74] Beeby AW. Criteria for the loading of slabs during construction. Proc Inst Civ Eng - Struct Build 2001;146:195–202. doi:10.1680/stbu.146.2.195.40079.
- [75] Vollum RL. Investigation into backprop forces and deflections at St George Wharf. Mag Concr Res 2003;55:449–460.
- [76] Puente I, Azkune M, Insausti A. Shore–slab interaction in multistory reinforced concrete buildings during construction: An experimental approach. Eng Struct 2007;29:731–741. doi:10.1016/j.engstruct.2006.06.018.
- [77] Azkune M, Puente I, Insausti A. Effect of ambient temperature on the redistribution of loads during construction of multi-storey concrete structures. Eng Struct 2007;29:933–941. doi:10.1016/j.engstruct.2006.07.005.
- [78] Azkune M, Puente I, Santilli A. Shore overloads during shoring removal. Eng Struct 2010;32:3629–3638. doi:10.1016/j.engstruct.2010.08.007.
- [79] Alvarado YA. Estudio experimental y numérico de la construcción de forjados hormigonados in situ mediante procesos de cimbrado, clareado y descimbrado de plantas consecutivas. PhD Thesis - Universitat Politècnica de València. [In Spanish], 2009.
- [80] Gasch I. Estudio de la evolución de cargas en forjados y estructuras auxiliares de apuntalamiento durante la construcción de edificios de hormigón in situ

- mediante procesos de cimbrado, clareado y descimbrado de plantas consecutivas. PhD Thesis - Universitat Politècnica de València. [In Spanish], 2012.
- [81] Gasch I, Alvarado YA, Calderón PA, Torres B. Transmisión de cargas entre forjados y puntales en un edificio de forjado reticular de casetón perdido utilizando clareado. *Inf la Construcción* 2013;65:195–202. doi:10.3989/ic.12.046.
- [82] Gasch I, Alvarado YA, Calderón PA, Ivorra S. Construction loads using a shoring–clearing–striking process. *Proc Inst Civ Eng - Struct Build* 2015;167:217–229. doi:10.1680/stbu.12.00006.
- [83] Gasch I, Alvarado YA, Calderón PA. Temperature effects on load transmission between slabs and shores. *Eng Struct* 2012;39:89–102. doi:10.1016/j.engstruct.2012.02.004.
- [84] Huang K, Liu X. Effects of temperature variations on safety of reinforced concrete structures during construction. *J Shanghai Jiaotong Univ* 2014;19:139–145. doi:10.1007/s12204-014-1482-x.
- [85] Adam JM, Buitrago M, Calderón PA. Discussion of “Reliability-Based Load Requirements for Formwork Shores during Concrete Placement ” by Hao Zhang, James Reynolds, Kim J. R. Rasmussen, and Bruce R. Ellingwood. *J Struct Eng* 2016;142:1–1. doi:10.1061/(ASCE)ST.1943.541X.0001362.
- [86] Vollum RL, Moss RM, Hossain TR. Slab deflections in the Cardington in-situ concrete frame building. *Mag Concr Res* 2002;54:23–34. doi:10.1680/mac.2002.54.1.23.
- [87] Liu XL, Lee HM, Chen WF. Shoring and reshoring of high-rise buildings. *Concr Int Des Constr* 1989;11:64–68.
- [88] Kwak H-G, Kim J-K. Determination of efficient shoring system in RC frame structures. *Build Environ* 2006;41:1913–1923. doi:10.1016/j.buildenv.2005.06.021.
- [89] Díaz J. Criterios técnicos para el descimbrado de estructuras de hormigón. Universidad Politécnica de Madrid, 2008.
- [90] Alvarado YA, Calderón PA, Gasch I, Adam JM. A numerical study into the evolution of loads on shores and slabs during construction of multistorey buildings. Comparison of partial striking with other techniques. *Eng Struct* 2010;32:3093–3102. doi:10.1016/j.engstruct.2010.05.028.
- [91] Adam JM, Buitrago M, Moragues JJ, Calderón PA. Limitations of Grundy & Kabaila’s simplified method and its repercussion on the safety and serviceability of successively shored building structures. *J Perform Constr*

- Facil 2017;31:1–10. doi:10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001038.
- [92] Liu XL, Chen WF. Effect of Creep on Load Distribution in Multistory Reinforced Concrete Buildings during construction. *Struct J* 1987;84:192–200.
- [93] Lee HM, Liu XL, Chen WF. Creep Analysis of Concrete Buildings during Construction. *J Struct Eng* 1991;117:3135–3148.
- [94] Duan MZ, Chen WF. Effects of creep and shrinkage on slab-shore loads and deflections during construction. *Proj Rep CE-STR-95-24* 1995.
- [95] Kwak H-G, Kim J-K. Time-dependent analysis of RC frame structures considering construction sequences. *Build Environ* 2006;41:1423–1434. doi:10.1016/j.buildenv.2005.05.013.
- [96] Xi HF, Fang DP, Zhang CM, Geng CD. Creep effects on load distribution of reinforced concrete structures during construction. *Gongcheng Lixue/Engineering Mech* 2007;24:91–96.
- [97] Fang D, Xi H, Wang X, Zhang C. Influences of shrinkage, creep, and temperature on the load distributions in reinforced concrete buildings during construction. *Tsinghua Sci Technol* 2009;14:756–764. doi:10.1016/S1007-0214(09)70146-4.
- [98] Simavorian D, De Brito J, Castro L, Azenha M. Analysis of the effect of shoring on the behaviour of reinforced concrete slabs. *Constr Build Mater* 2017;143:473–489. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.03.096.
- [99] Computers & Structures Inc. *SAP2000* 2008.
- [100] Hossain TR, Vollum RL. Prediction of slab deflections and validation against Cardington data. *Proc Inst Civ Eng - Struct Build* 2002;152:235–248.
- [101] Hossain TR, Vollum RL, Ahmed SU. Deflection Estimation of Reinforced Concrete Flat Plates Using ACI Method. *ACI Struct J* 2011;108:405–413. doi:10.14359/51682980.
- [102] Kang SM, Eom TS, Kim JY. Reshoring effects on deflections of multi-shored flat plate systems under construction. *Struct Eng Mech* 2013;45:455–470. doi:10.12989/sem.2013.45.4.455.
- [103] Hwang H-J, Park H-G, Hong G-H, Kim J-Y, Kim Y-N. Time-Dependent Deflection of Slab Affected by Construction Load. *ACI Struct J* 2016;113:557–566. doi:10.14359/51687943.
- [104] Alvarado YA, Buitrago M, Gasch I, Domínguez MN, Cipagauta MA. Short- and long-term deflections of RC building structures influenced by construction processes. *Struct Eng Mech* 2017;64:173–181.

- doi:<https://doi.org/10.12989/sem.2017.64.2.173>.
- [105] Alvarado YA, Buitrago M, Gasch I, Prieto CA, Ardila YA. Stage of construction: An essential consideration in designing reinforced concrete building structures. *Struct Concr* 2017;1–9. doi:10.1002/suco.201700128.
- [106] Buitrago M. Influencia del empleo de elementos de control de carga en los puntales en la construcción de edificios de forjados consecutivos de hormigón in situ. Aplicación al edificio de la Facultad de Bellas Artes de la Universidad Politécnica de Valencia. Universitat Politècnica de València, 2012. doi:<http://hdl.handle.net/10251/53627>.
- [107] ANSYS 15.0. Theory reference. ANSYS Inc. 2014.
- [108] EHE-08. Instrucción de Hormigón Estructural 2008.
- [109] EAE. Instrucción de Acero Estructural 2011.
- [110] Kernes RG, Edwards JR, Dersch MS, Lange DA, Barkan CPL. Investigation of the Dynamic Frictional Properties of a Concrete Crosstie Rail Seat and Pad and its Effect on Rail Seat Deterioration (RSD). *Transp. Res. Board* 91st Annu. Meet., Illinois: Railtec; 2011, p. 1–14.
- [111] Gorst JS, Williamson SJ, Pallett PF, Clark LA. Research Report 071: Friction in temporary works. Birmingham: 2003.
- [112] Lasheras FS, Vilán Vilán JA, Nieto PJG, Del Coz Díaz JJ. The use of design of experiments to improve a neural network model in order to predict the thickness of the chromium layer in a hard chromium plating process. *Math Comput Model* 2010;52:1169–1176. doi:10.1016/j.mcm.2010.03.007.
- [113] Del Coz Díaz JJ, García Nieto PJ, Álvarez Rabanal FP, Lozano Martínez-Luengas A. Design and shape optimization of a new type of hollow concrete masonry block using the finite element method. *Eng Struct* 2011;33:1–9. doi:10.1016/j.engstruct.2010.09.012.
- [114] Del Coz Díaz JJ, García Nieto PJ, Castro-Fresno D, Menéndez Rodríguez P. Steady state numerical simulation of the particle collection efficiency of a new urban sustainable gravity settler using design of experiments by FVM. *Appl Math Comput* 2011;217:8166–8178. doi:10.1016/j.amc.2011.03.044.
- [115] Del Coz Díaz J, Serrano López M, López-Colina Pérez C, Álvarez Rabanal F. Effect of the vent hole geometry and welding on the static strength of galvanized RHS K-joints by FEM and DOE. *Eng Struct* 2012;41:218–233. doi:10.1016/j.engstruct.2012.03.050.
- [116] Castro-Fresno D, Del Coz Díaz JJ, Alonso Martínez M, Blanco-Fernandez E, Polanco Madrazo JA. Numerical and experimental study of a new type of clip for joining cables. *Eng Struct* 2012;44:107–121.

doi:10.1016/j.engstruct.2012.05.048.

- [117] Del Coz Díaz JJ, Álvarez Rabanal FP, García Nieto PJ, Rocés-García J, Alonso-Estébanez A. Nonlinear buckling and failure analysis of a self-weighted metallic roof with and without skylights by FEM. *Eng Fail Anal* 2012;26:65–80. doi:10.1016/j.engfailanal.2012.07.019.
- [118] Del Coz Díaz JJ, Nieto PJG, Lozano Martínez-Luengas A, Suarez Domínguez FJ, Domínguez Hernández J. Non-linear numerical analysis of plywood board timber connections by DOE-FEM and full-scale experimental validation. *Eng Struct* 2013;49:76–90. doi:10.1016/j.engstruct.2012.11.003.
- [119] Navarro-Manso A, Del Coz Díaz JJ, Alonso-Martínez M, Blanco-Fernández E, Castro-Fresno D. New launching method for steel bridges based on a self-supporting deck system: FEM and DOE analyses. *Autom Constr* 2014;44:183–196. doi:10.1016/j.autcon.2014.04.008.
- [120] Alonso-Martínez M, Navarro-Manso A, Castro-Fresno D, Álvarez-Rabanal FP, del Coz Díaz JJ. Improvement of a System for Catchment, Pretreatment, and Treatment of Runoff Water Using PIV Tests and Numerical Simulation. *J Irrig Drain Eng* 2014;140:1-8. doi:10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000749.
- [121] Del Coz Díaz JJ, Álvarez-Rabanal FP, Gencel O, Nieto PJG, Alonso-Martínez M, Navarro-Manso A, et al. Hygrothermal study of lightweight concrete hollow bricks: A new proposed experimental–numerical method. *Energy Build* 2014;70:194–206. doi:10.1016/j.enbuild.2013.11.060.
- [122] Sutcu M, Del Coz Díaz JJ, Álvarez Rabanal FP, Gencel O, Akkurt S. Thermal performance optimization of hollow clay bricks made up of paper waste. *Energy Build* 2014;75:96–108. doi:10.1016/j.enbuild.2014.02.006.
- [123] Navarro-Manso A, Del Coz Díaz JJ, Alonso-Martínez M, Castro-Fresno D, Alvarez Rabanal FP. Patch loading in slender and high depth steel panels: FEM-DOE analyses and bridge launching application. *Eng Struct* 2015;83:74–85. doi:10.1016/j.engstruct.2014.10.051.
- [124] Del Coz Diaz JJ, Garcia-Nieto PJ, Alvarez-Rabanall FP, Alonso-Martínez M, Dominguez-Hernandez J, Perez-Bella JM. The use of response surface methodology to improve the thermal transmittance of lightweight concrete hollow bricks by FEM. *Constr Build Mater* 2014;52:331–344. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.11.056.
- [125] Statgraphics. Statgraphics Centurion XVI. StatPoint Technologies, Inc. 2013.
- [126] UNE-EN 1065. Puntales telescópicos regulables de acero. Especificaciones del producto, diseño y evaluación por cálculos y ensayos 1999:40.
- [127] UNE-EN ISO 6892-1. Materiales metálicos. Ensayo de tracción. Parte 1:

- Método de ensayo a temperatura ambiente 2010.
- [128] EN 1992-1-1. Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings 2004.
 - [129] Hadipriono FC, Wang H-K. CAUSES OF FALSEWORK COLLAPSES DURING CONSTRUCTION. *Struct Saf* 1987;4:179–195.
 - [130] Soane A. Learning from experience to avoid collapse. *Proceeding Inst Civ Eng Forensic Eng* 2016;169:127–132. doi:10.1680/jfoen.16.00004.
 - [131] Adam JM, Parisi F, Sagaseta J, Lu X. Research and practice on progressive collapse and robustness of building structures in the 21 st century. *Eng Struct* 2018.
 - [132] Sagaseta J, Olmati P, Micallef K, Cormie D. Punching shear failure in blast-loaded RC slabs and panels. *Eng Struct* 2017;147:177–194. doi:10.1016/j.engstruct.2017.04.051.
 - [133] Olmati P, Sagaseta J, Cormie D, Jones AEK. Simplified reliability analysis of punching in reinforced concrete flat slab buildings under accidental actions. *Eng Struct* 2017;130:83–98. doi:10.1016/j.engstruct.2016.09.061.
 - [134] Fascetti A, Kunnath SK, Nisticò N. Robustness evaluation of RC frame buildings to progressive collapse. *Eng Struct* 2015;86:242–249. doi:10.1016/j.engstruct.2015.01.008.
 - [135] Micallef K, Sagaseta J, Fernández Ruiz M, Muttoni A. Assessing punching shear failure in reinforced concrete flat slabs subjected to localised impact loading. *Int J Impact Eng* 2014;71:17–33. doi:10.1016/j.ijimpeng.2014.04.003.
 - [136] Bao Y, Kunnath SK, El-Tawil S, Lew HS. Macromodel-Based Simulation of Progressive Collapse: RC Frame Structures. *J Struct Eng* 2008;134:1079–1091. doi:10.1061/(ASCE)0733-9445(2008)134:7(1079).
 - [137] El-Tawil S, Li H, Kunnath S. Computational Simulation of Gravity-Induced Progressive Collapse of Steel-Frame Buildings: Current Trends and Future Research Needs. *J Struct Eng* 2014;140:1–12. doi:10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000897.
 - [138] Qian K, Li B. Performance of Three-Dimensional Reinforced Concrete Beam-Column Substructures under Loss of a Corner Column Scenario. *J Struct Eng* 2013;139:584–594. doi:10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000630.
 - [139] Yi W-J, Kunnath SK, Zhang F-Z, Xiao Y. Large-scale experimental evaluation of building system response to sudden column removal. *Struct. Congr.* 2011, vol. 1, ASCE 2014; 2011, p. 2353–7.

- [140] Pham AT, Tan KH, Yu J. Numerical investigations on static and dynamic responses of reinforced concrete sub-assemblages under progressive collapse. *Eng Struct* 2016. doi:10.1016/j.engstruct.2016.07.042.
- [141] Ren P, Li Y, Lu X, Guan H, Zhou Y. Experimental investigation of progressive collapse resistance of one-way reinforced concrete beam-slab substructures under a middle-column-removal scenario. *Eng Struct* 2016;118:28–40. doi:10.1016/j.engstruct.2016.03.051.
- [142] Brunesi E, Nascimbene R, Parisi F, Augenti N. Progressive collapse fragility of reinforced concrete framed structures through incremental dynamic analysis. *Eng Struct* 2015;104:65–79. doi:10.1016/j.engstruct.2015.09.024.
- [143] DoD. Department of Defense. Design of buildings to resist progressive collapse (UFC 4-023-03) 2009.
- [144] GSA. General Services Administration. Progressive collapse analysis and design guidelines for new federal office buildings and major organization projects 2000.
- [145] Qian K, Li B. Performance of Three-Dimensional Reinforced Concrete Beam-Column Substructures under Loss of a Corner Column Scenario. *J Struct Eng* 2013;139:584–594. doi:10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000630.
- [146] Sagaseta J, Ulaeto N, Russell J. Structural robustness of concrete flat slab structures. *ACI Struct J* 2017;315:273–298.
- [147] Russell JM, Owen JS, Hajirasouliha I. Experimental investigation on the dynamic response of RC flat slabs after a sudden column loss. *Eng Struct* 2015;99:28–41. doi:10.1016/j.engstruct.2015.04.040.
- [148] Qian K, Li B. Resilience of flat slab structures in different phases of progressive collapse. *ACI Struct J* 2016;113:537–548. doi:10.14359/51688619.
- [149] BS 5975. Code of practice for temporary works procedures and the permissible stress design of falsework 2011.
- [150] CS: Concrete Society. Guide to the design and construction of reinforced concrete flat slabs. Technical report no 64; 2007.
- [151] Buitrago M, Adam JM, Moragues JJ, Calderón PA. Load transmission between slabs and shores during the construction of RC building structures - A review. *Eng Struct* 2018.
- [152] EN 1990. Eurocode: Basis of structural design 2002.
- [153] LSTC. LS-DYNA theory manual 2012.

APÉNDICE 1. ENSAYO EXPERIMENTAL

A1.1. Introducción

En este Apéndice se presentan los planos que definieron el ensayo experimental, la preparación del ensayo y todos los resultados obtenidos según la siguiente secuencia:

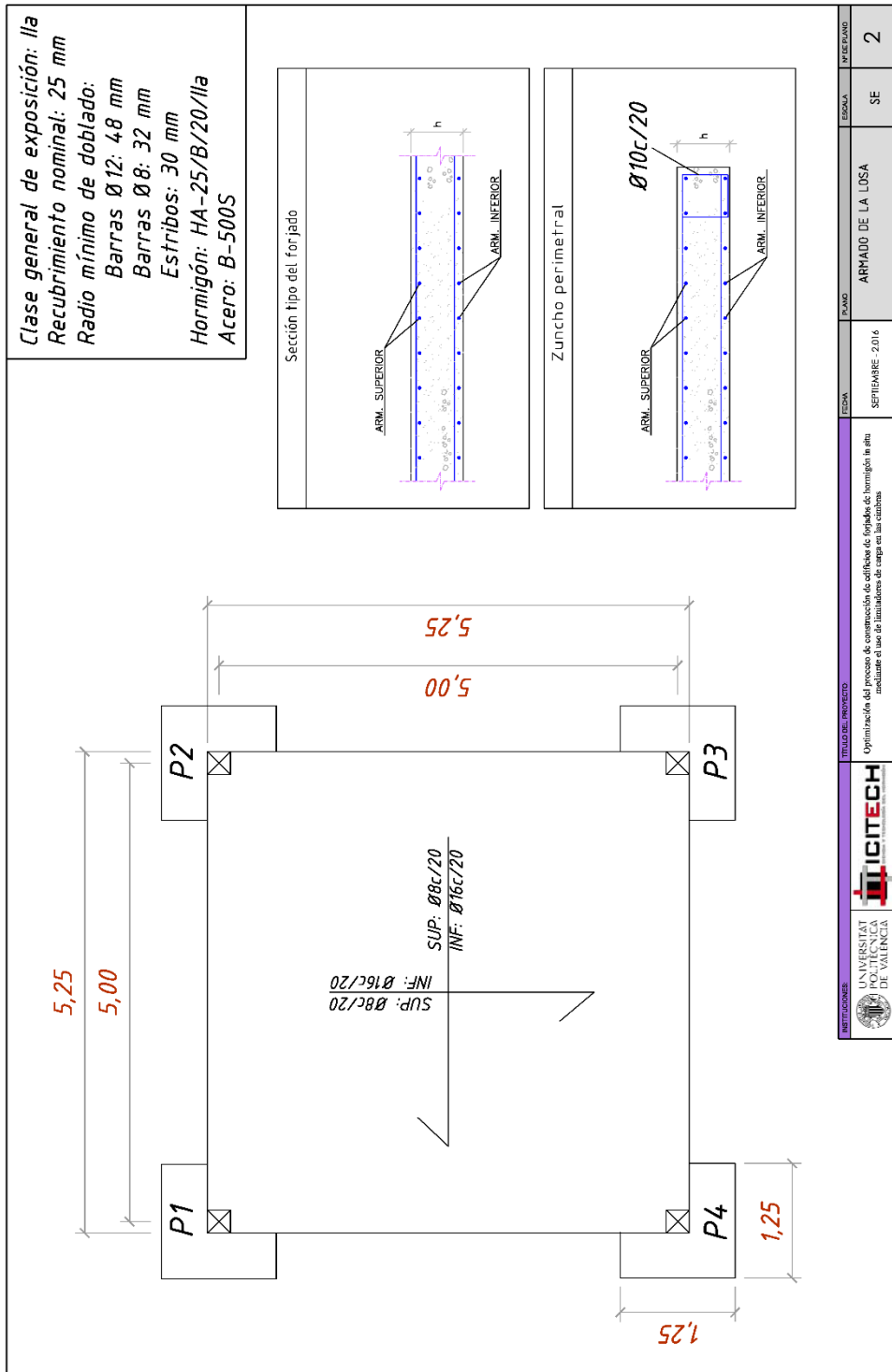
- Cargas en puntales.
- Momentos en puntales. Cálculo y resultados.
- Flechas en forjados.
- Curvas fuerza-desplazamiento en puntales.
- Secuencias de descimbrado y cargas en puntales durante el descimbrado.

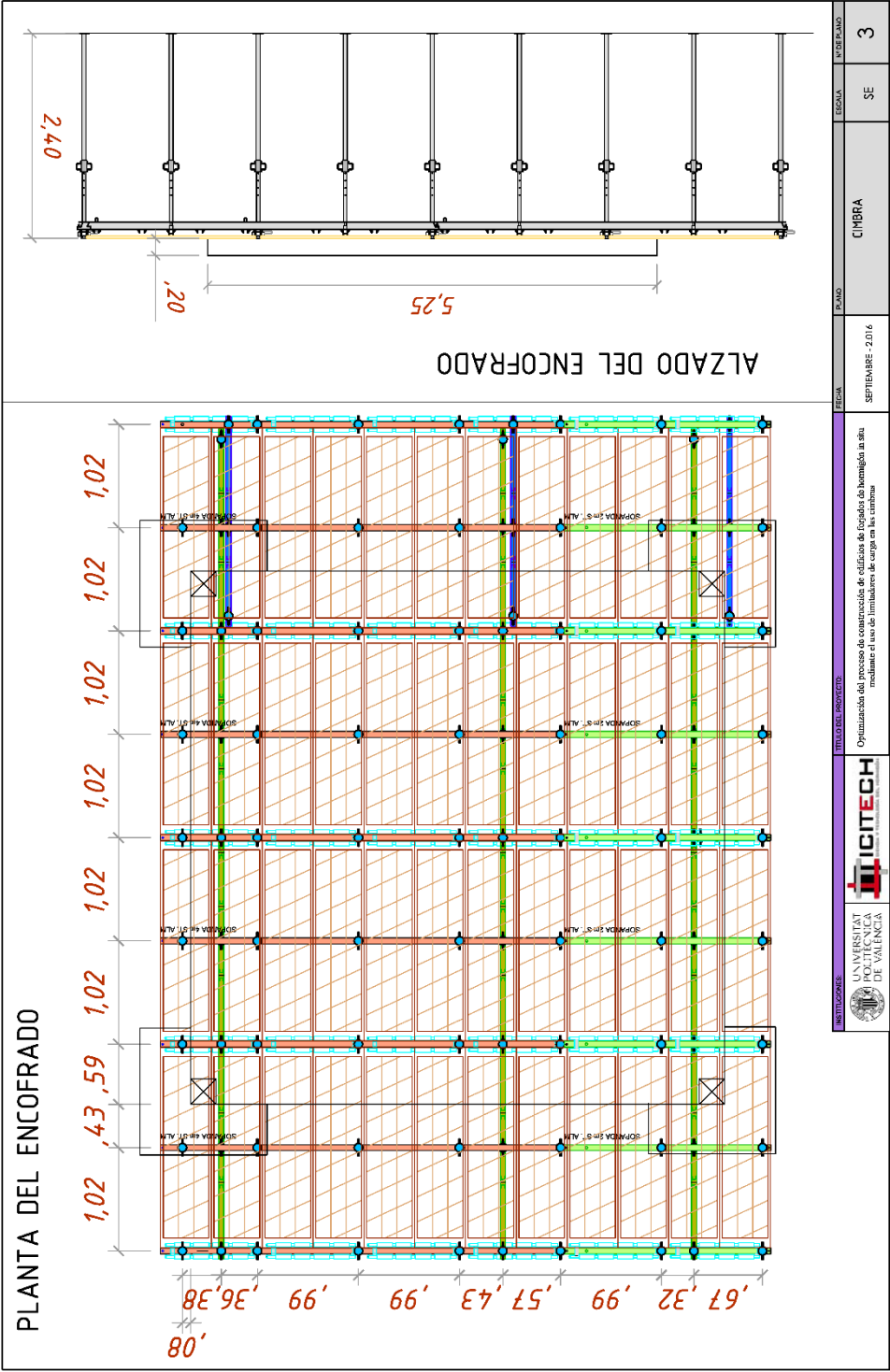
A1.2. Planos

Para la definición del ensayo experimental se contó con la colaboración de una empresa constructora (Levantina, Ingeniería y Construcción, S.L.) y una empresa de cimbras (Encofrados J. Alsina S.A.) que colaboraron en la ejecución del ensayo. Los planos que definieron el ensayo experimental se presentan a continuación con el siguiente orden:

1. Situación y emplazamiento de los laboratorios del ICITECH.
2. Geometría y armado de la losa.
3. Cimbra.
4. Distribución de puntales hasta el día 03.
5. Distribución de puntales desde el día 03.
6. Disposición de las piscinas.
7. Ganchos de izado para elevar la losa en fase de demolición.







DISTRIBUCIÓN DE
PUNTALES HASTA
EL CLAREADO DEL
FORJADO

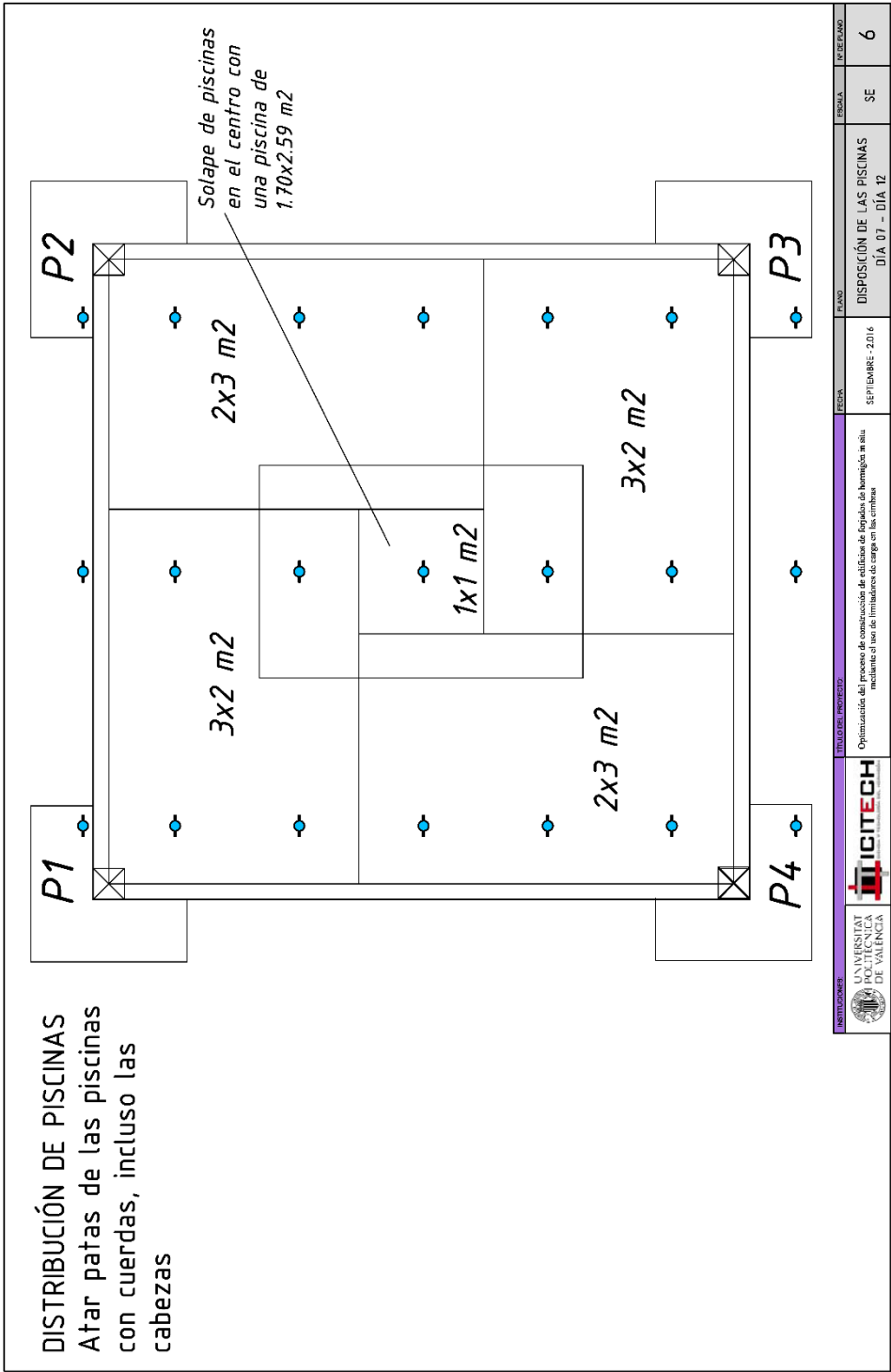
1	11	21./	31./	41./	51./	61./	71.	81.
2	12	22.	32	42	52	62	72.	82.
3	13	23./	33./	43./	53./	63./	73.	83.
4	14	24./	34./	44./	54./	64./	74.	84.
5	15	25./	35./	45./	55./	65./	75.	85.
6	16	26	36	46	56	66	76.	86.
7	17	27./	37./	47./	57./	67./	77.	87.
8	18	28./	38./	48./	58./	68./	78.	88.
9	19	29.	39	49	59	69	79.	89.
10	20	30./	40./	50./	60./	70./	80.	90.

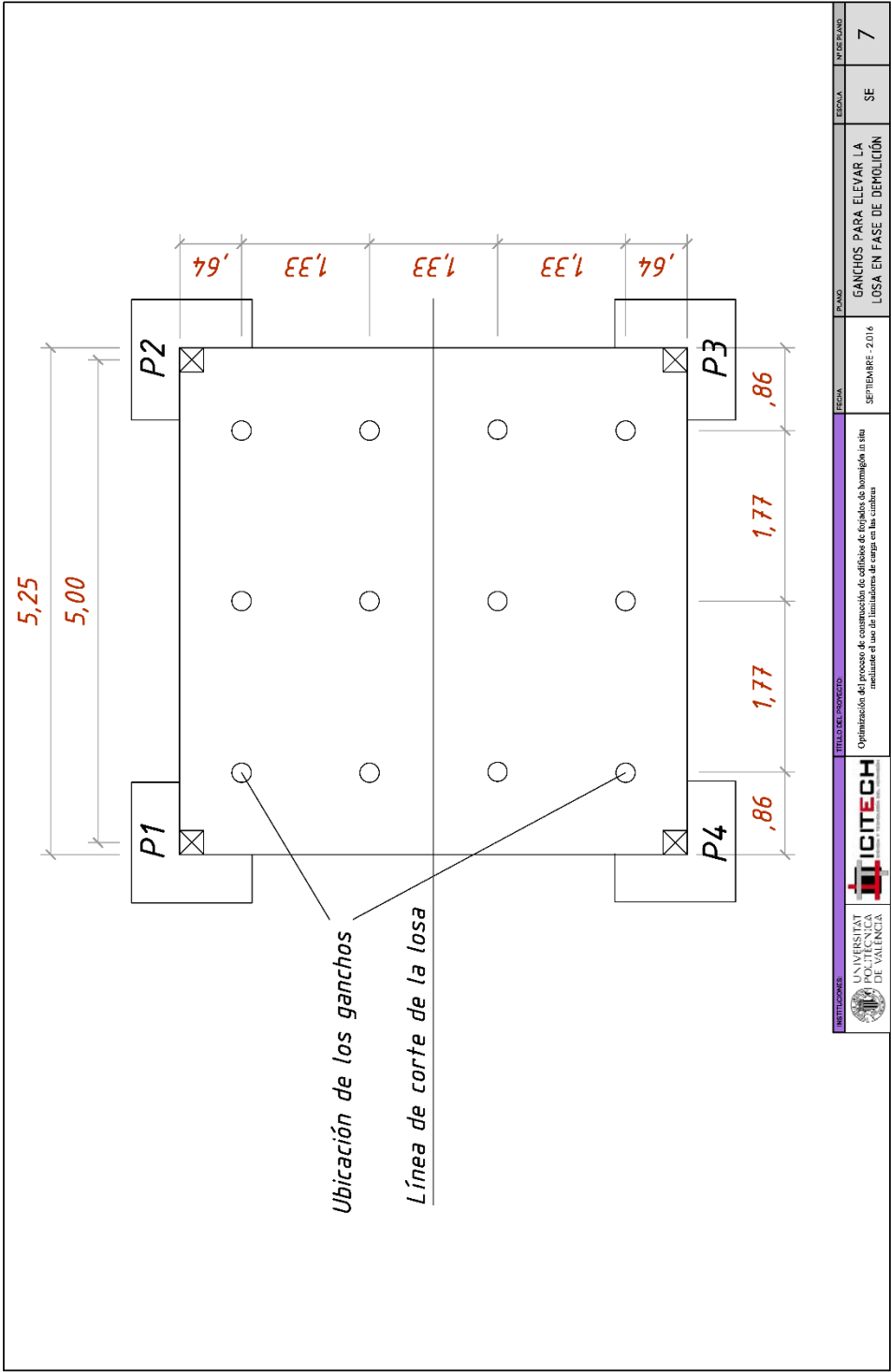
Puntal no instrumentado:
X

Puntal instrumentado:
X·l

Puntal instrumentado y
con limitador de carga:
X·lL

X: Nº de puntal





A1.3. Preparación del ensayo

A1.3.1. Preparación de cables y conexiones para galgas, captadores y termopares

La elaboración de cables que conectan los distintos dispositivos de medida (galgas, captadores y termopares) con el sistema de adquisición de datos fue necesaria para la adquisición de datos en tiempo real. Se emplearon aproximadamente 1100m de cable de distintas tipologías en función del dispositivo al que va conectado. En cada uno de los cables fueron soldadas las conexiones correspondientes para conectar los cables de los distintos dispositivos a la mesa de adquisición de datos. En la Fig. A1.1 puede observarse un detalle del proceso de soldadura (izquierda) y un detalle de cómo quedan los cables soldados a las conexiones (derecha).

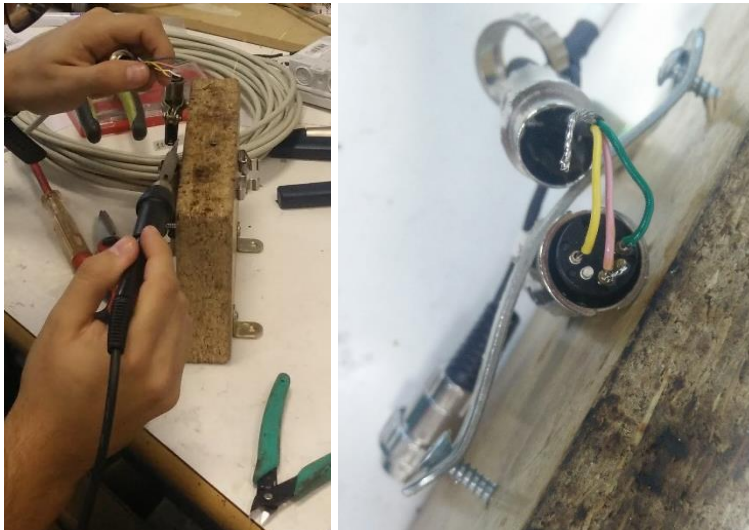


Fig. A1.1. Soldado de conexiones.

A1.3.2. Preparación de las pértigas con los captadores de desplazamiento

Las pértigas son elementos que permiten medir los descensos del forjado. Estos elementos están conectados tanto al suelo en uno de sus extremos como al forjado en el otro extremo. Estas pértigas presentan un sistema telescópico en el que el tubo de acero superior, que está en contacto con el forjado, se introduce en el tubo de acero inferior, en contacto con el suelo. La conexión de ambos tubos se realiza con un muelle que permite el descenso relativo de estos dos tubos, manteniendo el contacto tanto en el suelo como en el forjado. En la Fig. A1.2 se puede observar cómo aparecen instalados los captadores de desplazamiento en las pértigas, pudiendo

medir el desplazamiento relativo entre los dos tubos telescópicos al conectar cada extremo del captador en tubos distintos. Consecuentemente, el resultado que se obtiene de los captadores de desplazamiento es el descenso de los forjados.

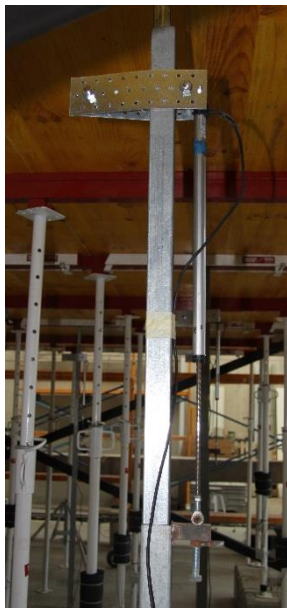


Fig. A1.2. Instalación de los captadores en las pértigas para medir desplazamientos/flechas.

A1.3.3. Pegado de galgas extensométricas en los puntales

En primer lugar, debe retirarse la pintura de los puntales para poder realizar el pegado de las galgas sobre la superficie de acero. Este paso es imprescindible debido a que las galgas necesitan ser pegadas en una superficie metálica. Se acotó mediante cinta la zona en la que se iba a retirar la pintura y se aplicó un producto decapante durante unos minutos. Posteriormente, con ayuda de una espátula se retiró la pintura de los puntales. En la Fig. A1.3 puede observarse la realización de este paso.



Fig. A1.3. Aplicación del decapante en la zona de pegado de galgas.

Una vez retirada la pintura, como se observar en la Fig. A1.4, se realizó el lijado de la zona acotada para la retirada de las impurezas que podrían quedar tras la aplicación del decapante.



Fig. A1.4. Lijado de la zona decapada para la retirada de impurezas.

Preparada ya la superficie metálica sobre la que pegar las galgas extensométricas, con ayuda de una plantilla, se realizó el posicionamiento de tres galgas a 120° . El pegado de tres galgas por puntal se realiza para tener una correcta recogida de la carga axial en cada puntal, obtenida a través del promedio de la deformación registrada por cada una de las galgas extensométricas. Una vez realizado el posicionamiento de las tres galgas, se limpia la superficie con acetona, se prepara la galga para su colocación y se aplica un par de gotas de adhesivo. En la Fig. A1.5 se observa este proceso.



Fig. A1.5. Posicionamiento de la galga y aplicación del adhesivo.

Para el pegado definitivo de la galga solo queda aplicar una presión sobre la misma durante un par de minutos y contra la superficie metálica, asegurando su verticalidad. En la Fig. A1.6 se muestra un ejemplo del pegado de una galga.



Fig. A1.6. Pegado de la galga.

Tras el pegado de las galgas es necesario protegerlas. Los puntales en una obra están sometidos a todo tipo de condiciones y tratamientos: manejo por distintos operarios, golpes, humedad, agua, variaciones de temperatura, etc. Para evitar que la humedad o el agua pueda afectar al sistema de medida se utilizaron dos sistemas de protección: 1) basado en la formación de una película de poliuretano alrededor de la galga con el producto PU-140 comercializado por HBM; y 2) basado en la aplicación de una especie de plastilina totalmente impermeable con el producto AK-22 comercializado también por HBM. Con el objetivo de aislar las galgas de los posibles golpes se instaló un tercer sistema de protección con una espuma (ARMAFLEX) rodeando la zona donde están pegadas las galgas. En la Fig. A1.7 puede observarse en detalle estos tres sistemas de protección.



Fig. A1.7. Primera, segunda y tercera protección aplicada a las galgas de los puntales.

Finalmente, en la Fig. A1.8 puede observarse los puntales preparados para su instalación.



Fig. A1.8. Puntales preparados para ser instalados.

A1.3.4. Preparación de los termopares

Otro de los resultados importantes del ensayo experimental es la temperatura, más bien la variación de la misma. Esta temperatura se registró a través de termopares embebidos en el hormigón de la losa y de probetas cilíndricas, así como también la medición de la temperatura ambiente. Como paso previo a su instalación fue necesario realizar una comprobación de la medida correcta de estos dispositivos en una medida continua. Para ello, como se observa en la Fig. A1.9, se realizó una primera prueba de corta duración para observar el funcionamiento de los termopares, y una segunda prueba de 15 días de duración con la disposición final del ensayo (extensión de cables incluida) para comprobar su correcto funcionamiento.

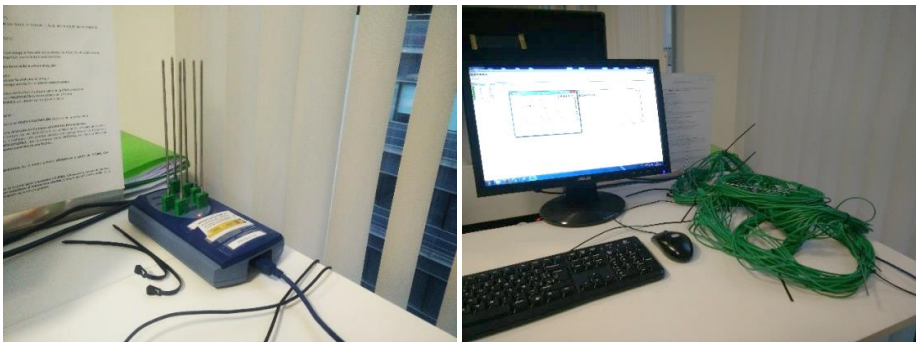


Fig. A1.9. Comprobación del correcto funcionamiento de termopares en medida continua.

A1.4. Cargas en puntales

En este sub-apartado se presentan las cargas de todos los puntales en función del tiempo. En primer lugar, la Fig. A1.10 presenta la distribución de los puntales en la planta del edificio.

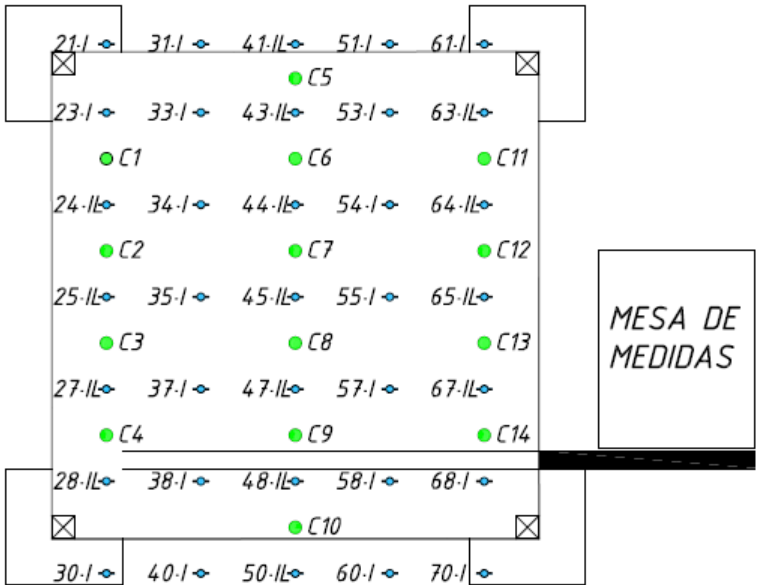
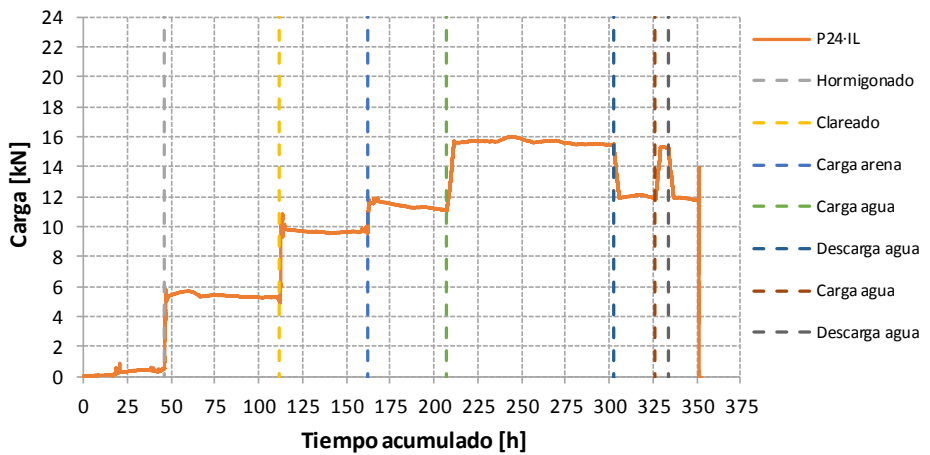
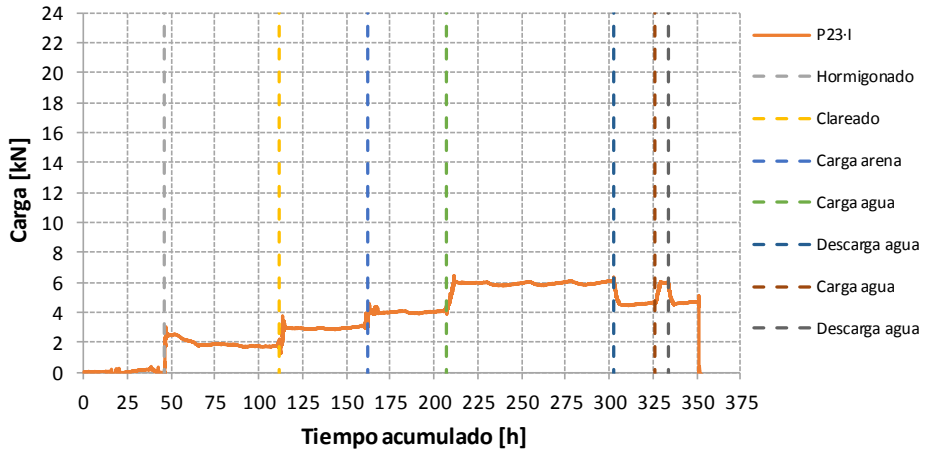
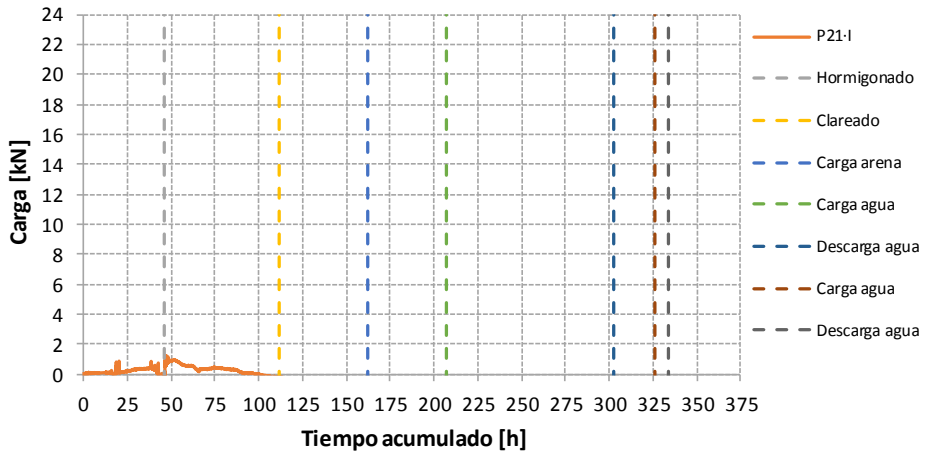
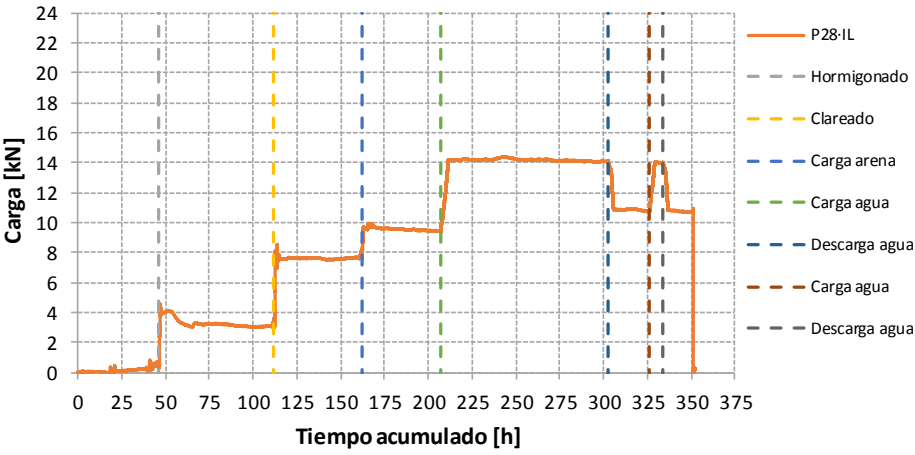
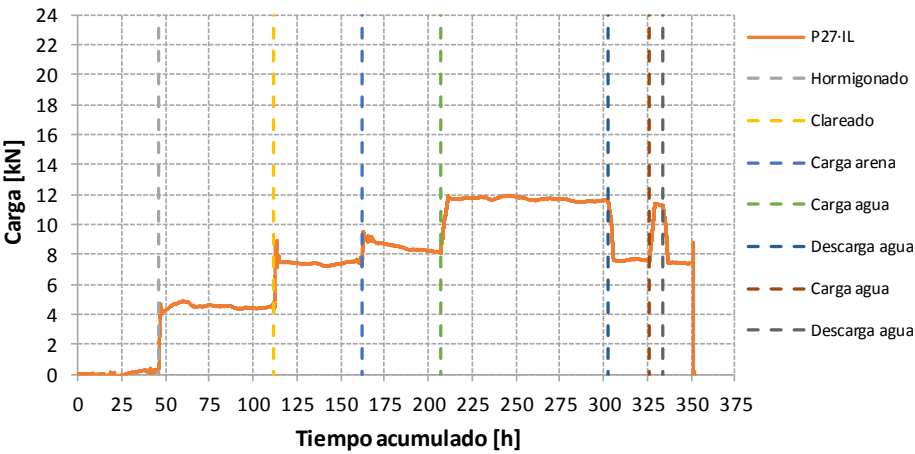
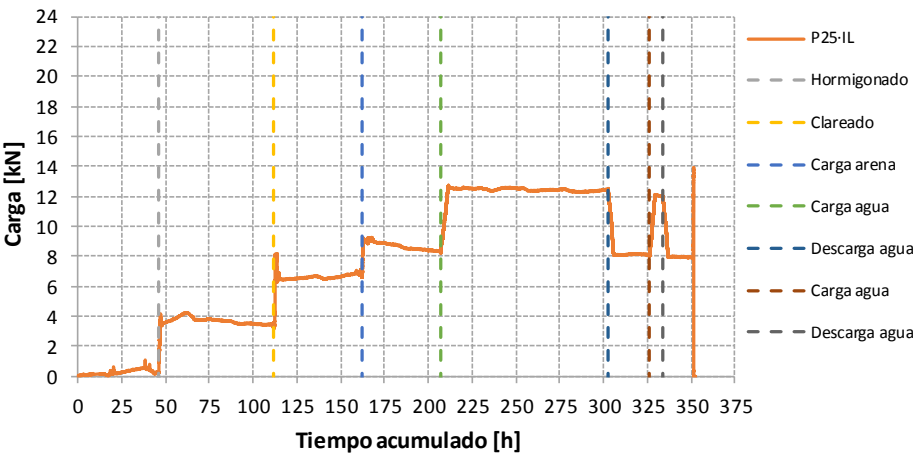


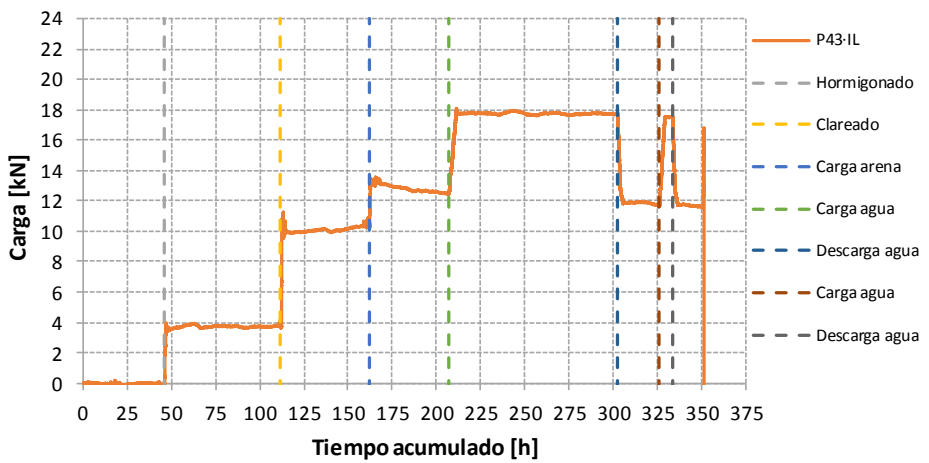
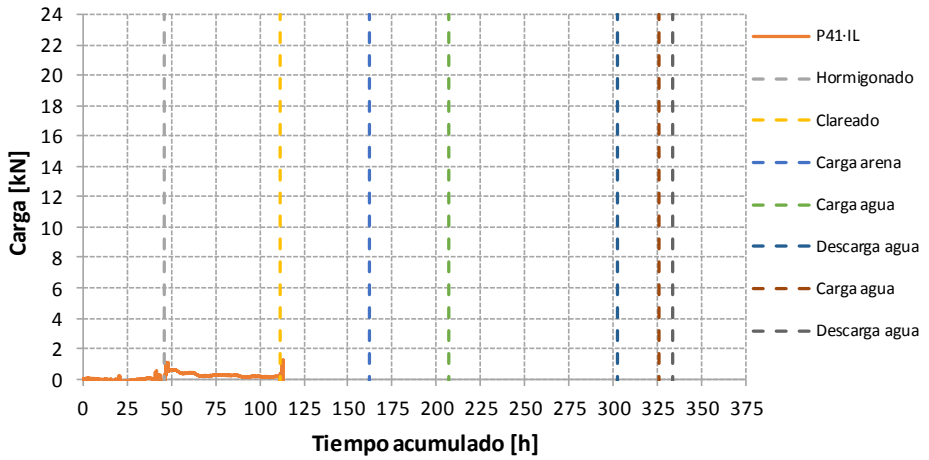
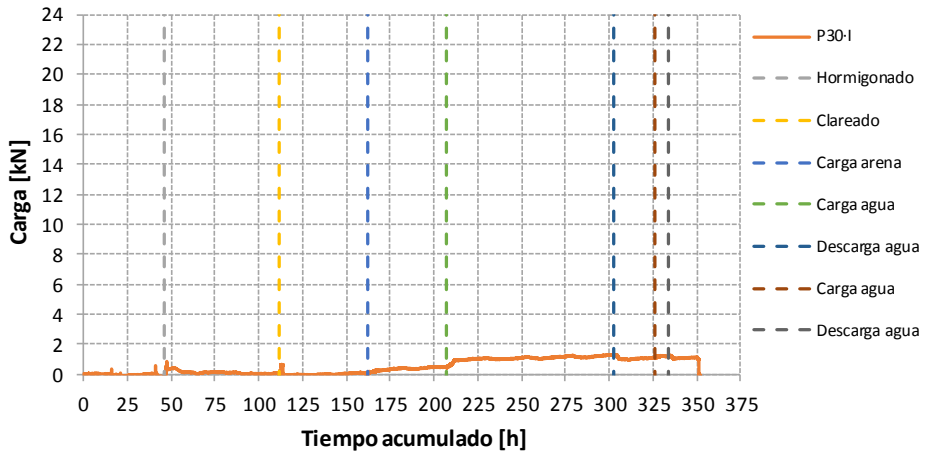
Fig. A1.10. Distribución de puntales.

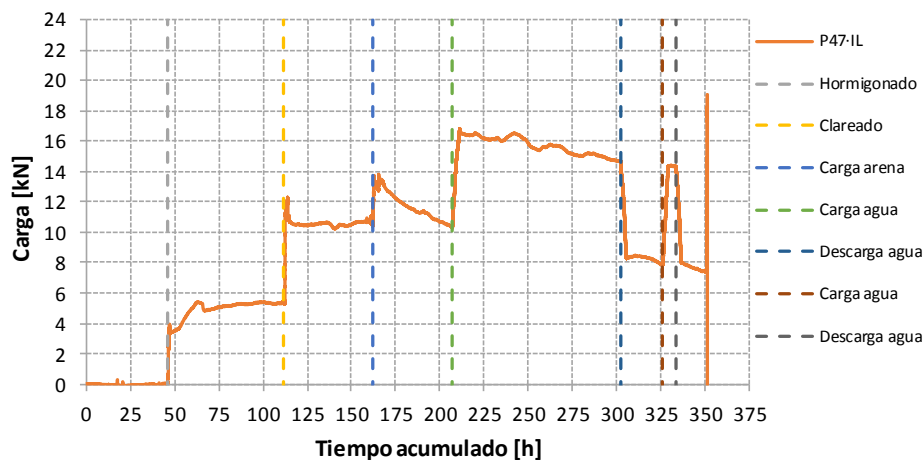
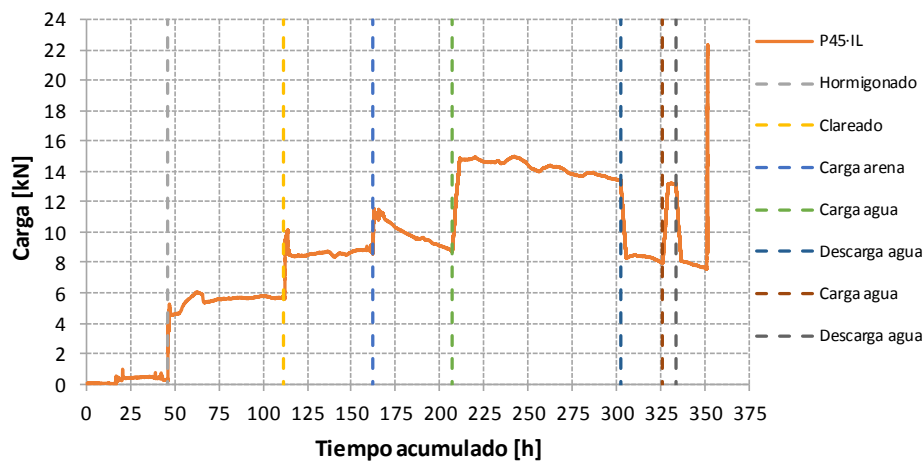
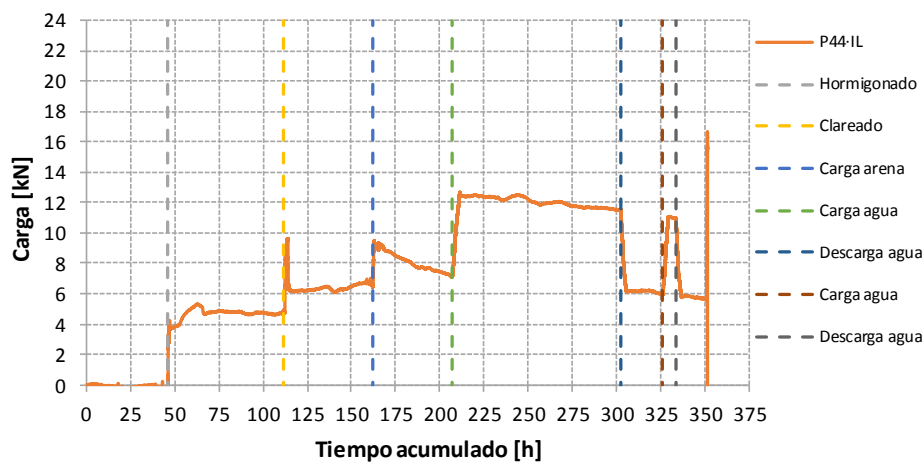
A continuación, se presentan las cargas en puntales en función del tiempo para los puntales de las sopandas principales, en primer lugar, y para los puntales de las sopandas secundarias, en segundo lugar. Además, en cada uno de los gráficos puede apreciarse el momento en el que se realizaron las operaciones detalladas en el apartado “5.3.2.2. Realización del ensayo”.

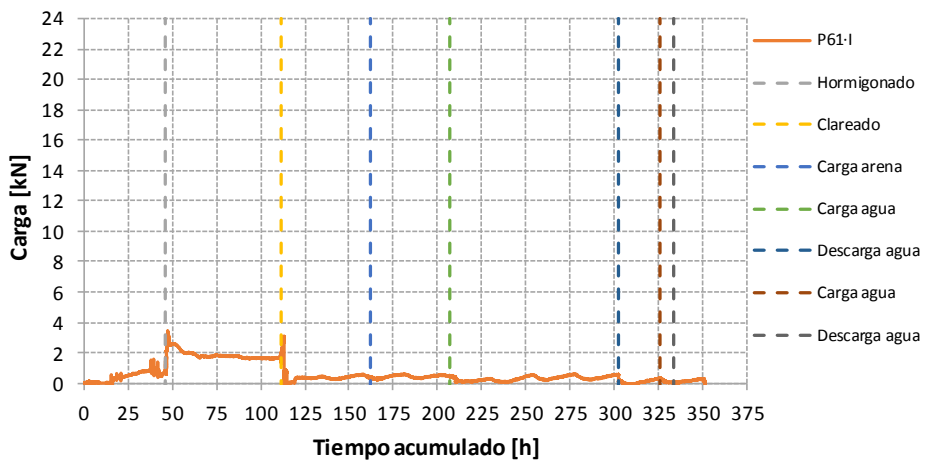
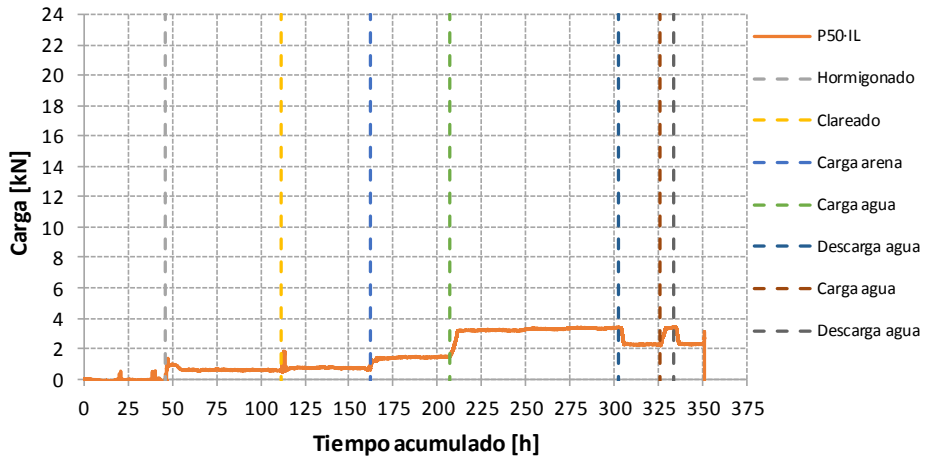
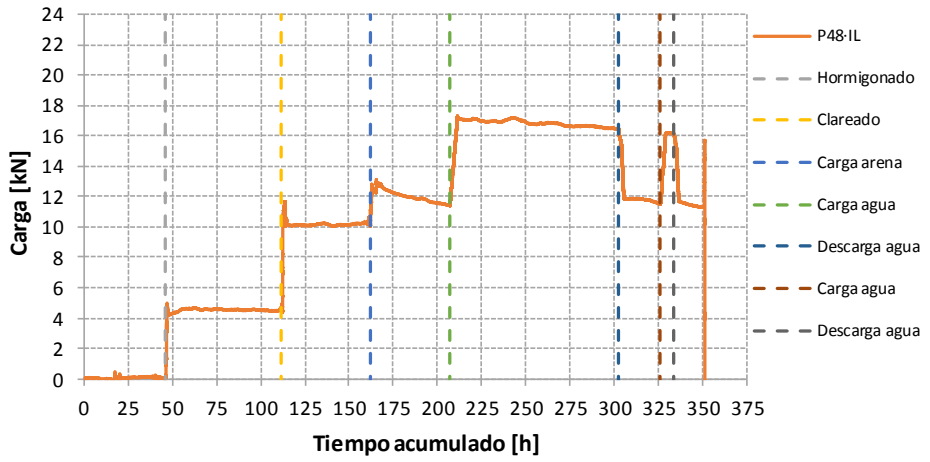
La carga de los puntales experimentó aumentos de la carga en las distintas operaciones constructivas (hormigonado, clareado, arena, agua y descimbrado). Ante situaciones de carga-descarga, los puntales recuperaron la carga introducida y volvieron a cargarse hasta niveles similares a la situación anterior a la descarga. Como se ha comentado en el apartado “5.4.5. Evolución de la temperatura del hormigón en la losa y en las probetas cilíndricas”, la disposición de la capa de arena produjo un enfriamiento de la parte superior de la losa, suavizándose durante los dos días siguientes a la disposición de la arena. La reducción del gradiente de temperatura registrado durante estos dos días provocó que la losa se deforme de forma inversa a como se deforma mediante la aplicación de una carga gravitatoria, es decir, asciende en su parte central quedándose apoyada en los pilares. Este efecto provocó una reducción en la carga de los puntales más cercano al centro de vano, como se puede observar en los diferentes gráficos presentados.

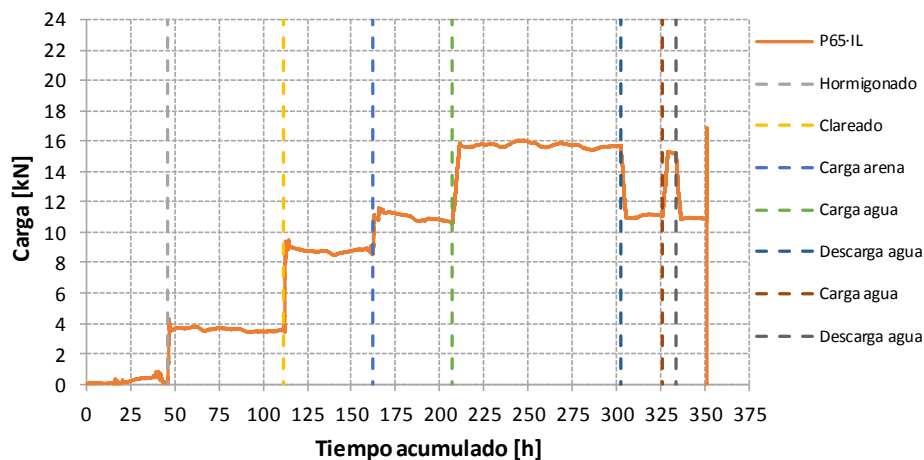
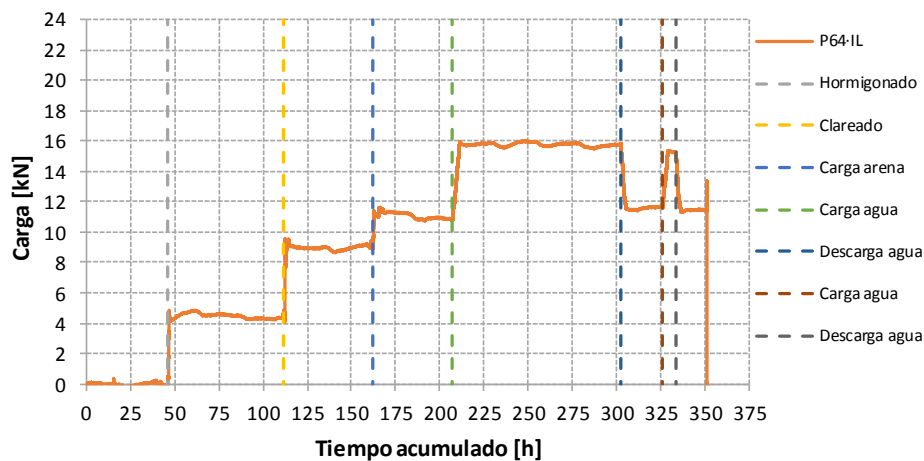
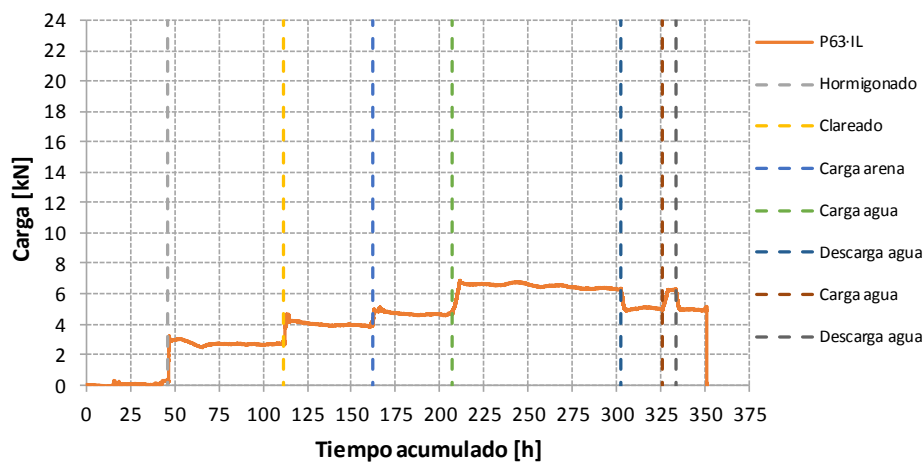


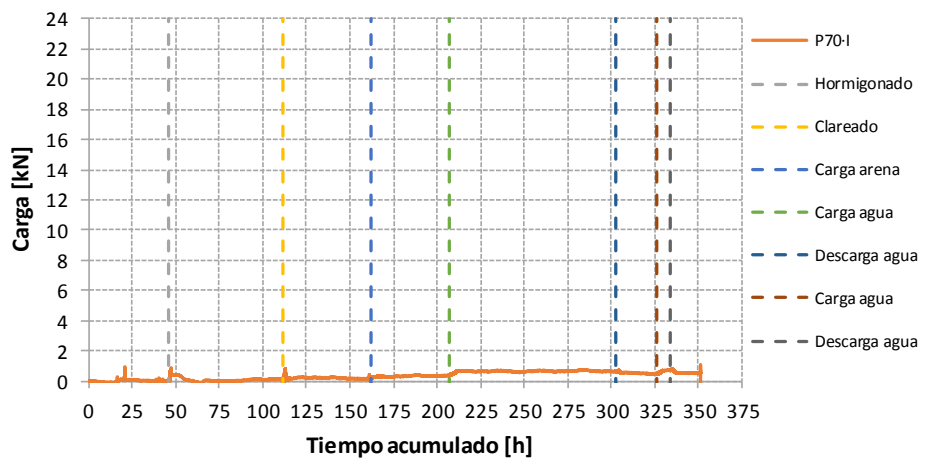
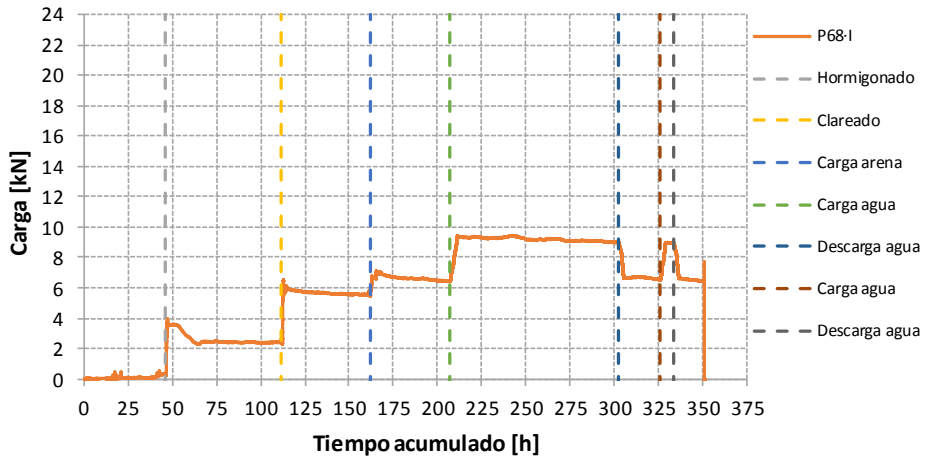
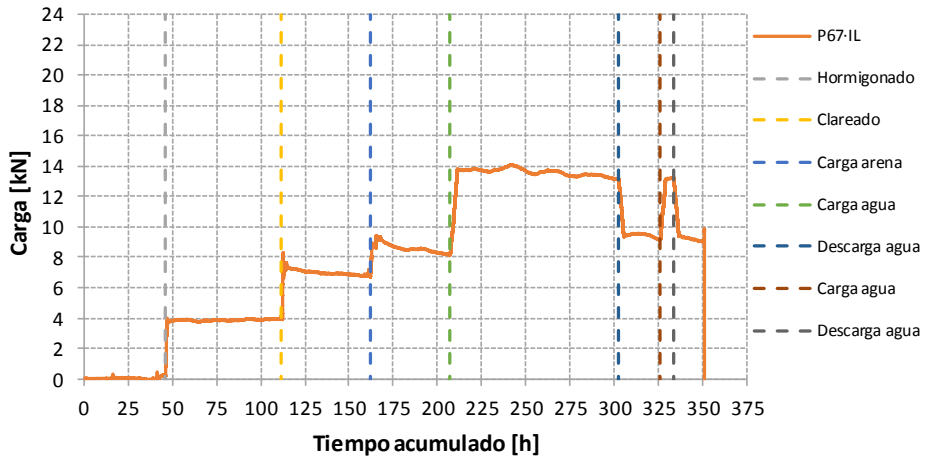


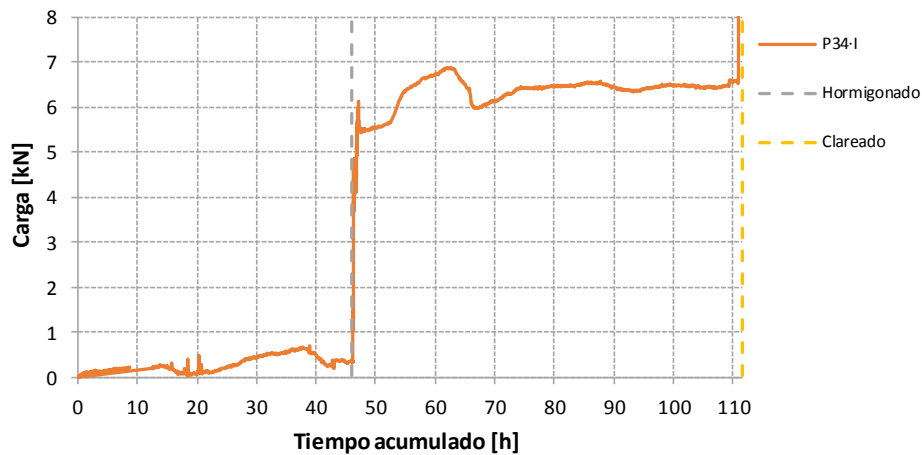
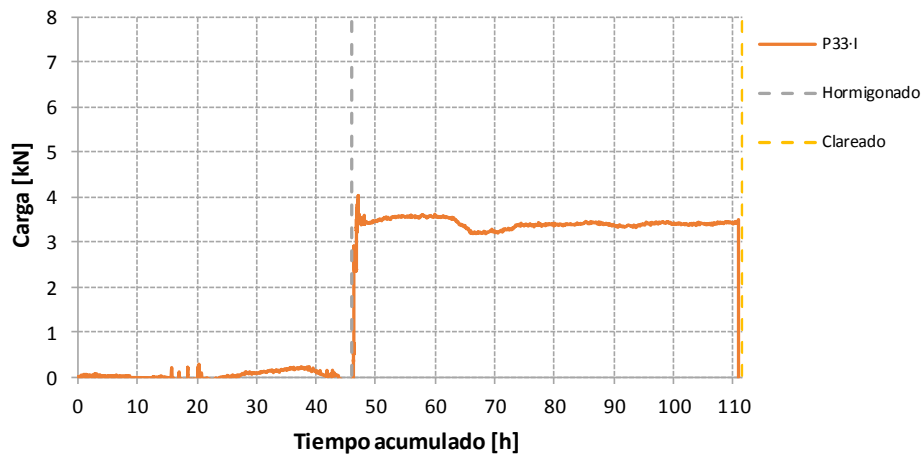
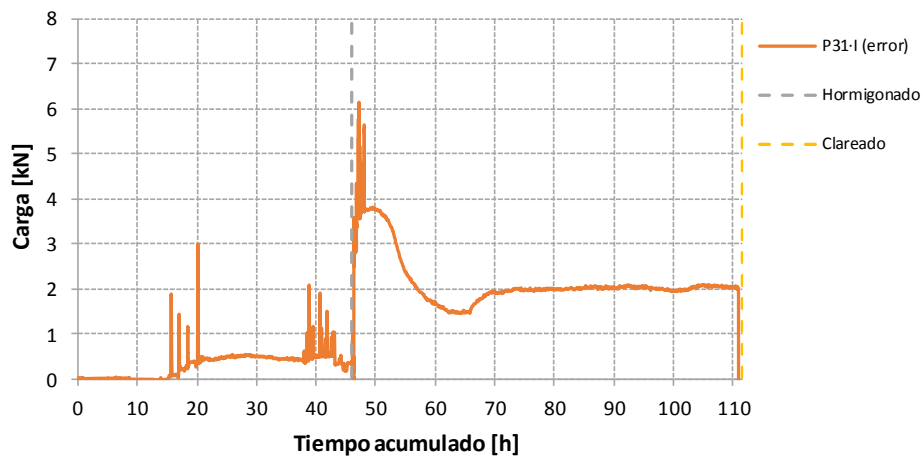


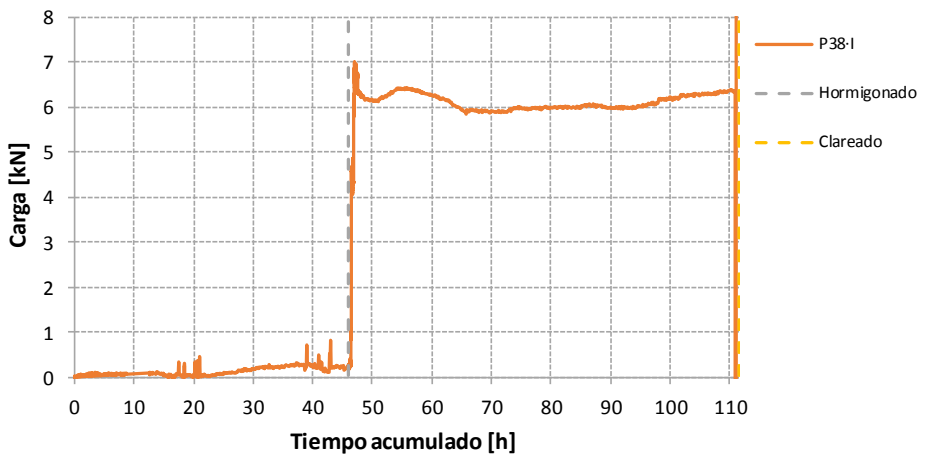
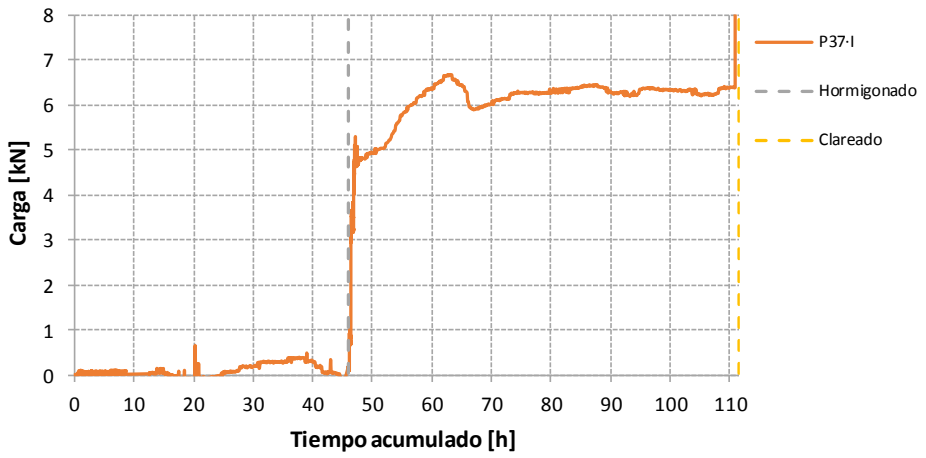
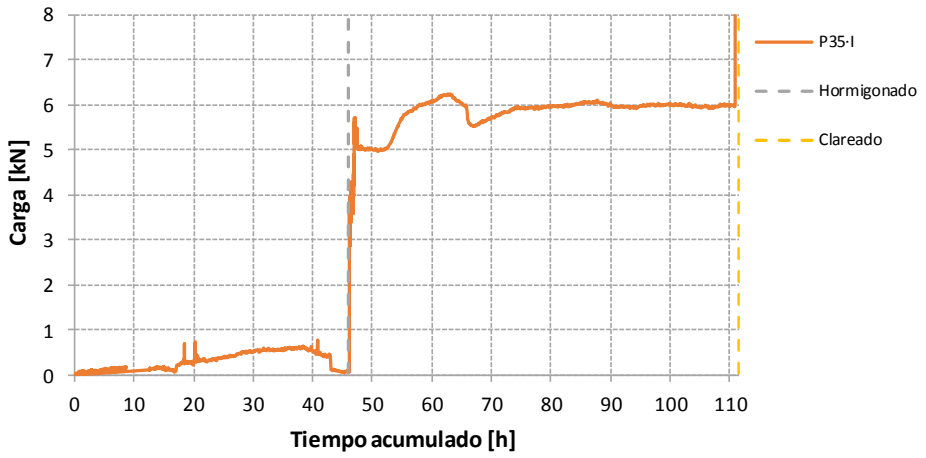


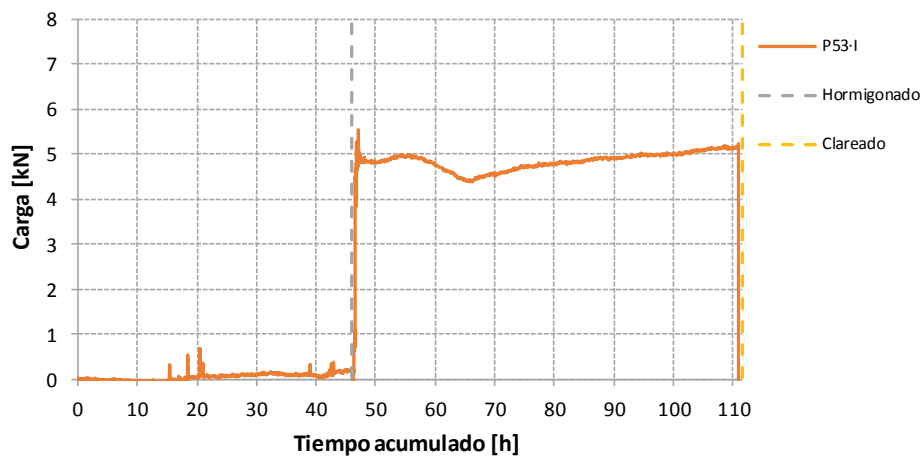
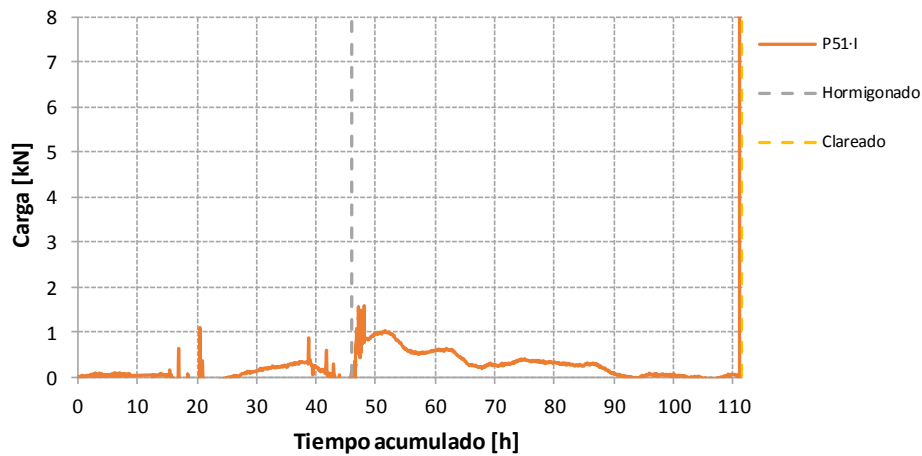
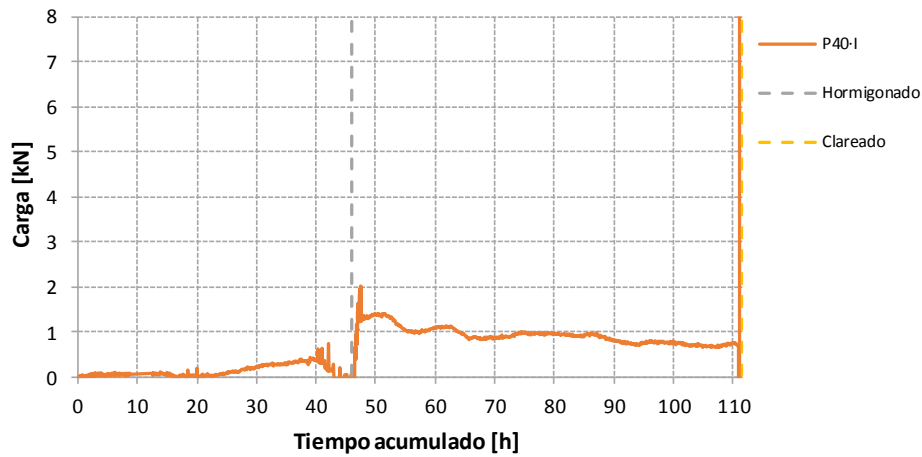


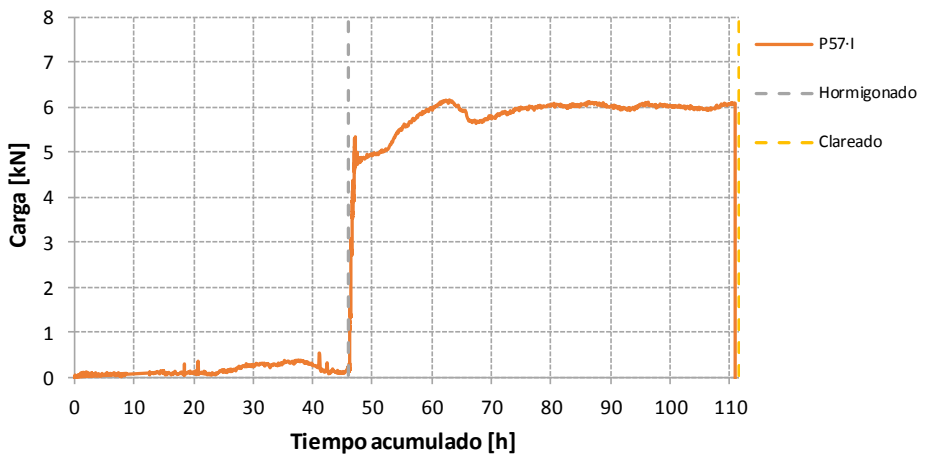
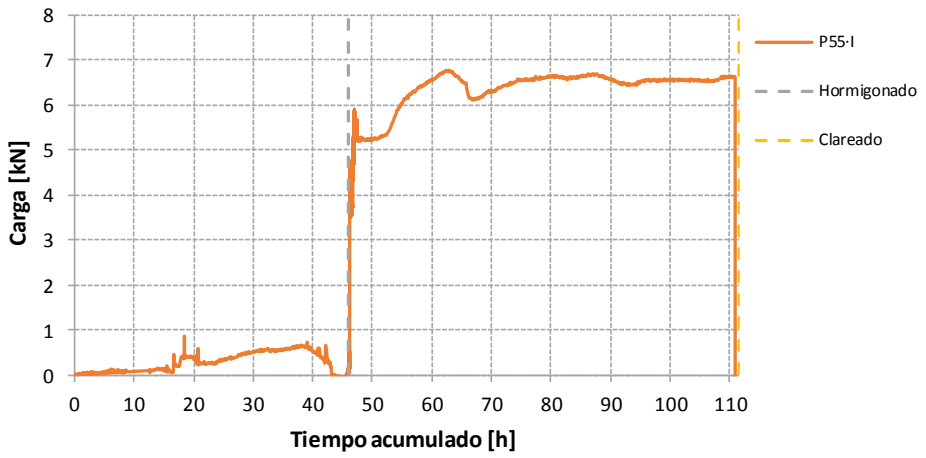
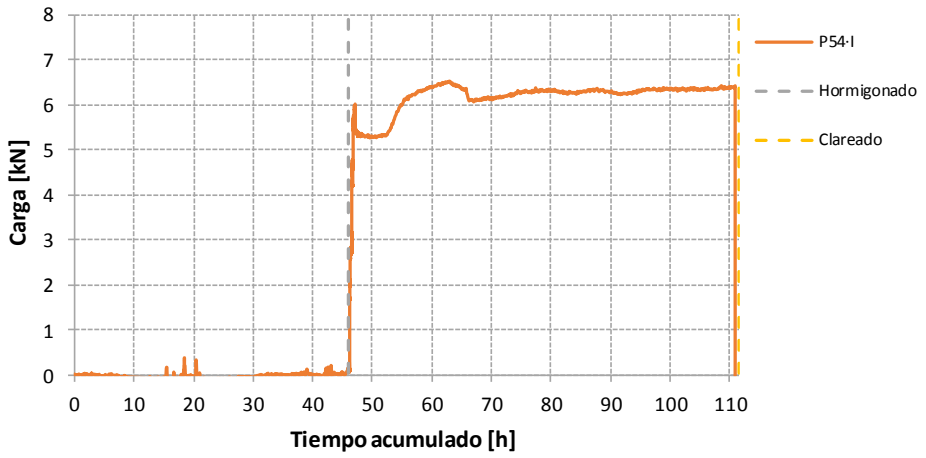


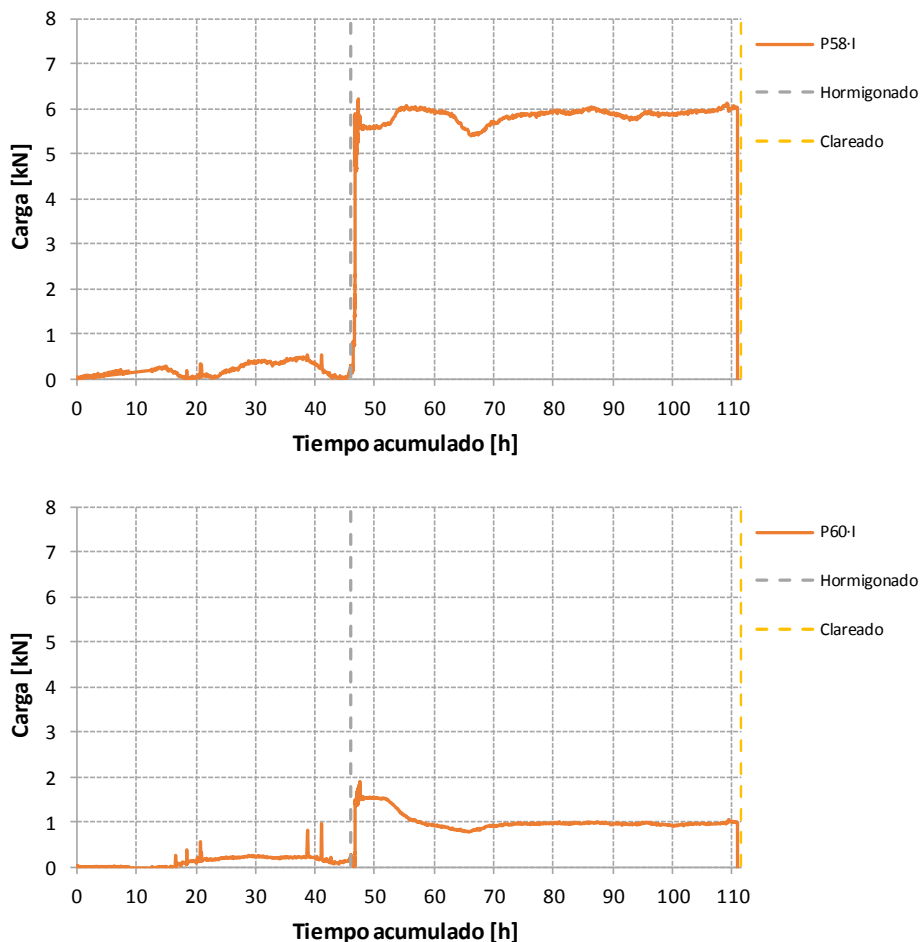












A1.5. Momentos en puntales

A1.5.1. Cálculo a partir de la deformación de tres puntos

En este sub-apartado se detalla el procedimiento de cálculo de los momentos en puntales a partir de la ubicación de las tres galgas extensométricas, sus medidas de deformación y la posición del pasador respecto a las tres galgas, definida genéricamente en la Fig. A1.11.

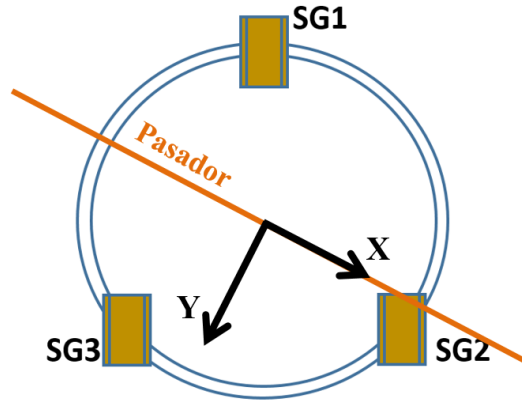


Fig. A1.11. Posición genérica del pasador y criterio de ejes para el cálculo de los momentos.

El objetivo consiste en calcular los momentos M_x (x viene definido por el pasador), M_y (el que debe reducir los limitadores de carga) y el $M_{máx}$ (tomando como eje de rotación principal la fibra neutra de la sección).

Para ello, y bajo la hipótesis de que las secciones planas se mantienen planas tras deformarse, es necesario obtener la ecuación del plano de deformaciones de la sección a partir del valor de las tres deformaciones medidas (es decir, a partir de 3 puntos con coordenadas X e Y, marcando la posición de la galga con origen de coordenadas en el centro de la sección tubular; y la coordenada Z marcando la deformación que produce momento, $\varepsilon - \bar{\varepsilon}$. Nótese que el axil del puntal se obtuvo con la deformación media $\bar{\varepsilon}$).

- SG1 = A ; (ax;ay;az)
- SG2 = B ; (bx;by;bz)
- SG3 = C ; (cx;cy;cz)

Obtenemos entonces dos vectores contenidos en el plano de deformaciones:

- $\mathbf{AB} = (bx-ax, by-ay, bz-az)$
- $\mathbf{AC} = (cx-ax, cy-ay, cz-az)$

De forma que la ecuación del plano se obtiene:

$$\begin{vmatrix} x - ax & bx - ax & cx - ax \\ y - ay & by - ay & cy - ay \\ z - az & bz - az & cz - az \end{vmatrix} = 0$$

$$(x - ax) \cdot [(by - ay) \cdot (cz - az) - (bz - az) \cdot (cy - ay)] +$$

$$(y - ay) \cdot [(bz - az) \cdot (cx - ax) - (bx - ax) \cdot (cz - az)] +$$

$$(z - az) \cdot [(bx - ax) \cdot (cy - ay) - (by - ay) \cdot (cx - ax)] = 0$$

Desarrollando esta expresión se obtiene:

$$[(by - ay) \cdot (cz - az) - (bz - az) \cdot (cy - ay)] \cdot X + [(bz - az) \cdot (cx - ax) - (bx - ax) \cdot (cz - az)] \cdot Y + [(bx - ax) \cdot (cy - ay) - (by - ay) \cdot (cx - ax)] \cdot Z - ax \cdot [(by - ay) \cdot (cz - az) - (bz - az) \cdot (cy - ay)] - ay \cdot [(bz - az) \cdot (cx - ax) - (bx - ax) \cdot (cz - az)] - az \cdot [(bx - ax) \cdot (cy - ay) - (by - ay) \cdot (cx - ax)] = 0$$

Cuya versión abreviada se puede escribir de la siguiente forma:

$$P \cdot X + Q \cdot Y + R \cdot Z - ax \cdot P - ay \cdot Q - az \cdot R = 0$$

Como en $X=Y=0, Z=0$, la ecuación debería reducirse a:

$$P \cdot X + Q \cdot Y + R \cdot Z = 0$$

Para la obtención de los momentos en cada uno de los ejes es necesario realizar la integral, extendida al área del perfil tubular del puntal, de las deformaciones obtenidas del plano de deformaciones multiplicadas por las distancias perpendiculares al eje para el cual se está calculando el momento y multiplicadas por el módulo de elasticidad del acero (210 GPa).

De forma simplificada se discretiza la sección tubular en pequeños rectángulos (36; 9 por cuadrante formando un ángulo de 10 grados de apertura con el centro de la sección), se evalúa en el centro de cada rectángulo la deformación obtenida por el plano de deformaciones y se multiplica cada deformación por 1/36 del área, por el módulo de elasticidad y por la distancia en perpendicular al eje de cálculo del momento correspondiente. Se realiza este paso para los 36 elementos sumando los resultados de cada uno para la obtención del momento.

La obtención de los M_y y M_x se realiza de acuerdo a las siguientes ecuaciones:

$$M_y = \frac{A}{36} \cdot E \cdot \sum_{i=1}^{36} z_i(x_i, y_i) \cdot x_i$$

$$M_x = \frac{A}{36} \cdot E \cdot \sum_{i=1}^{36} z_i(x_i, y_i) \cdot y_i$$

La obtención del momento máximo requiere conocer la ecuación de la fibra neutra y la distancia en perpendicular de cualquiera de los 36 elementos a la fibra neutra. La ecuación de la fibra neutra es el resultado de la intersección del plano de deformaciones con el plano $Z = 0$:

$$P \cdot X + Q \cdot Y - ax \cdot P - ay \cdot Q - az \cdot R = 0$$

Como en $X=0, Y=0$, la ecuación debería reducirse a:

$$P \cdot X + Q \cdot Y = 0$$

El centro de cada uno de los 36 elementos viene definido en el sistema de coordenadas por $E_i(x_i, y_i)$. La distancia en perpendicular y en valor absoluto de cada uno de estos elementos a la fibra neutra se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$d_i = \frac{|P \cdot x_i + Q \cdot y_i|}{\sqrt{P^2 + Q^2}}$$

La obtención de $M_{\text{máx}}$ se realiza de acuerdo a la siguiente expresión:

$$M_{\text{máx}} = \frac{A}{36} \cdot E \cdot \sum_{i=1}^{36} z_i(x_i, y_i) \cdot d_i$$

Las coordenadas de los puntos centrales de cada uno de los 36 elementos se calculan mediante la siguiente expresión:

$$E_i\left(\frac{\emptyset}{2} \cdot \cos \alpha_i, \frac{\emptyset}{2} \cdot \sin \alpha_i, z_i\right) \rightarrow E_i(0.023 \cdot \cos \alpha_i, 0.023 \cdot \sin \alpha_i, z_i)$$

Donde z_i se obtiene de la ecuación del plano de deformaciones considerando $x_i = 0.023 \cdot \cos \alpha_i$ e $y_i = 0.023 \cdot \sin \alpha_i$. Teniendo en cuenta que la ecuación del plano de deformación es:

$$P \cdot X + Q \cdot Y + R \cdot Z = 0$$

La coordenada z_i se obtiene según la siguiente expresión:

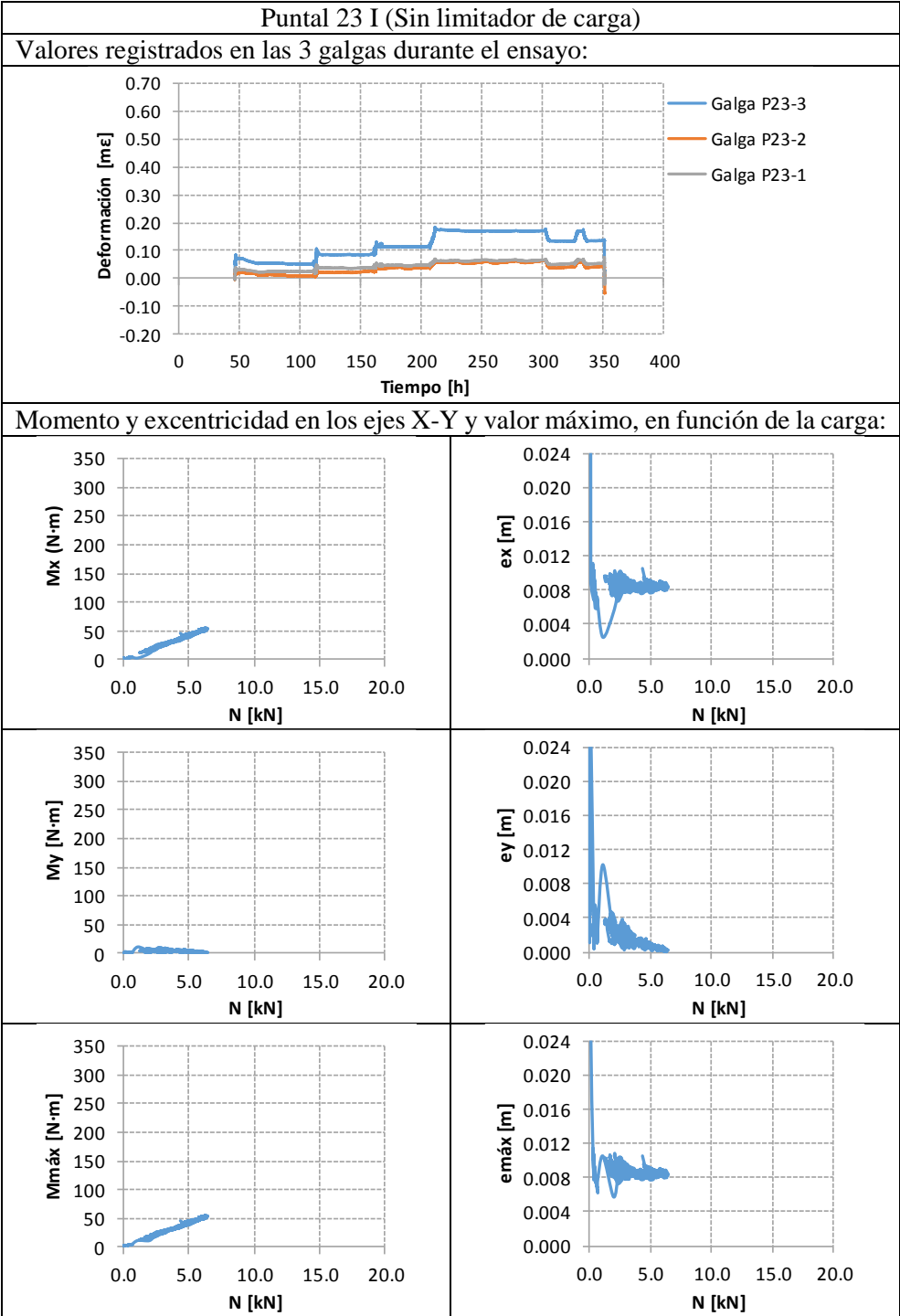
$$z_i = -\frac{P}{R} \cdot 0.023 \cdot \cos \alpha_i - \frac{Q}{R} \cdot 0.023 \cdot \sin \alpha_i$$

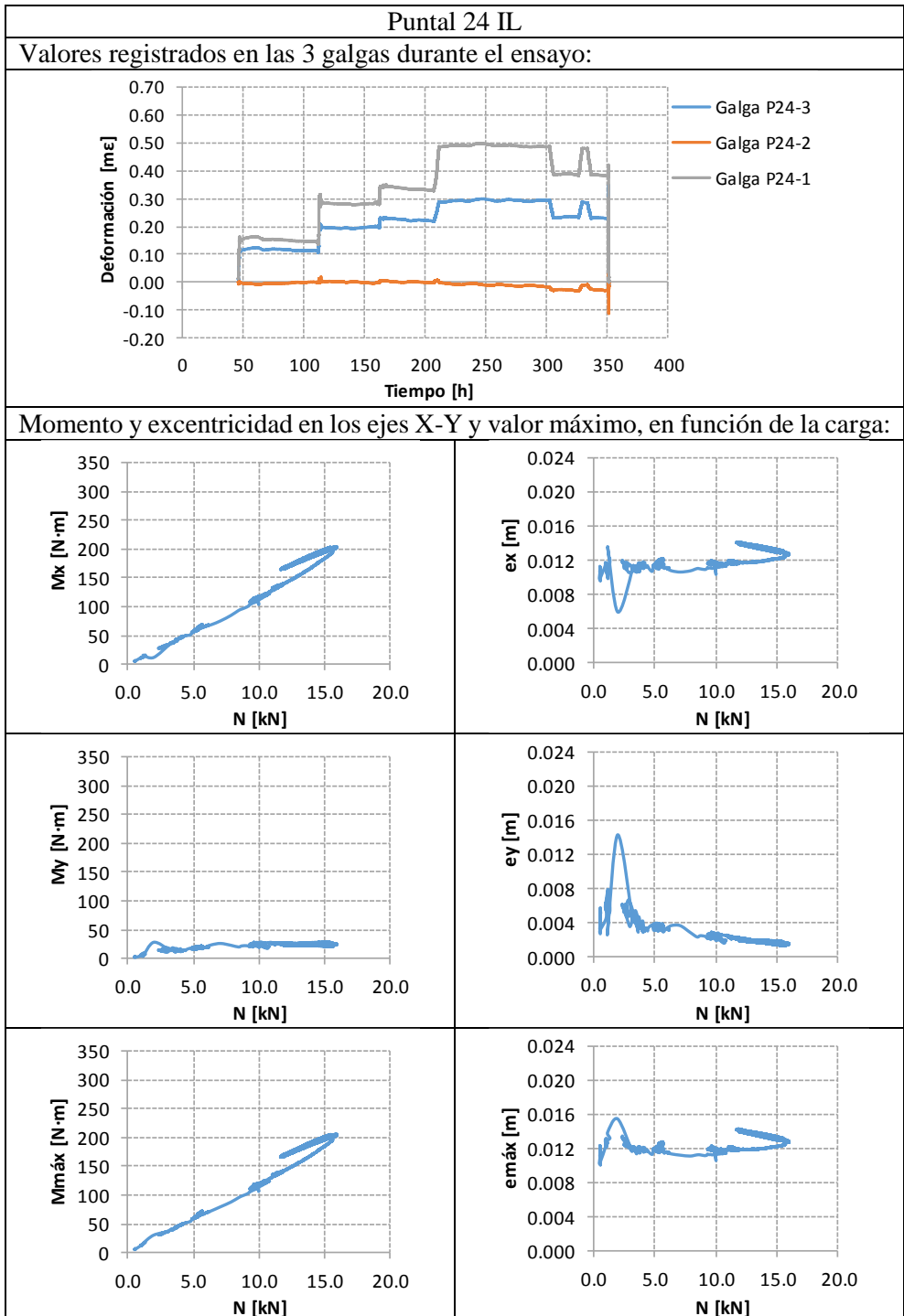
Por tanto, las coordenadas necesarias de cada uno de los elementos para el cálculo del momento máximo son:

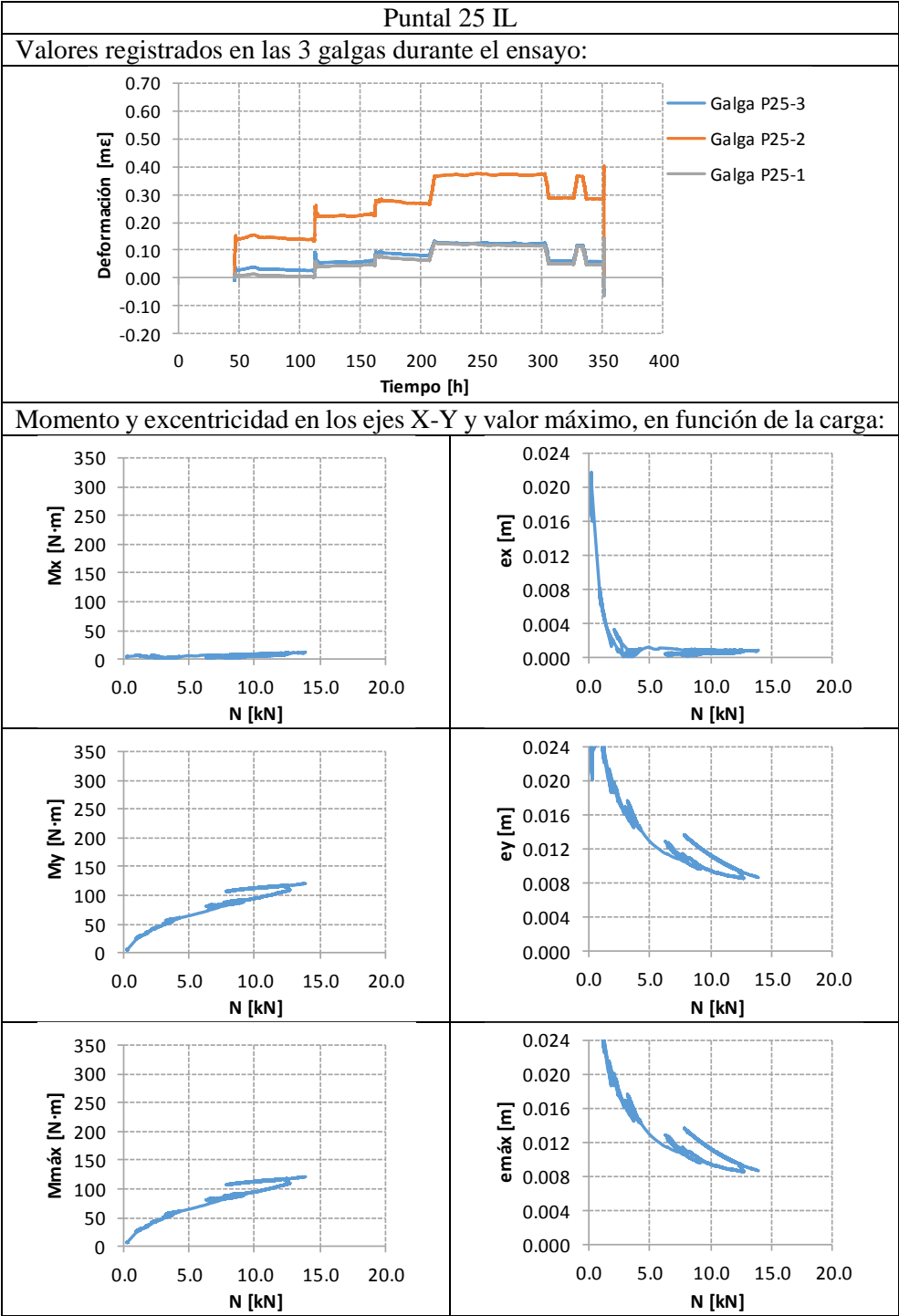
$$E_i\left(0.023 \cdot \cos \alpha_i, 0.023 \cdot \sin \alpha_i, -\frac{P}{R} \cdot 0.023 \cdot \cos \alpha_i - \frac{Q}{R} \cdot 0.023 \cdot \sin \alpha_i\right)$$

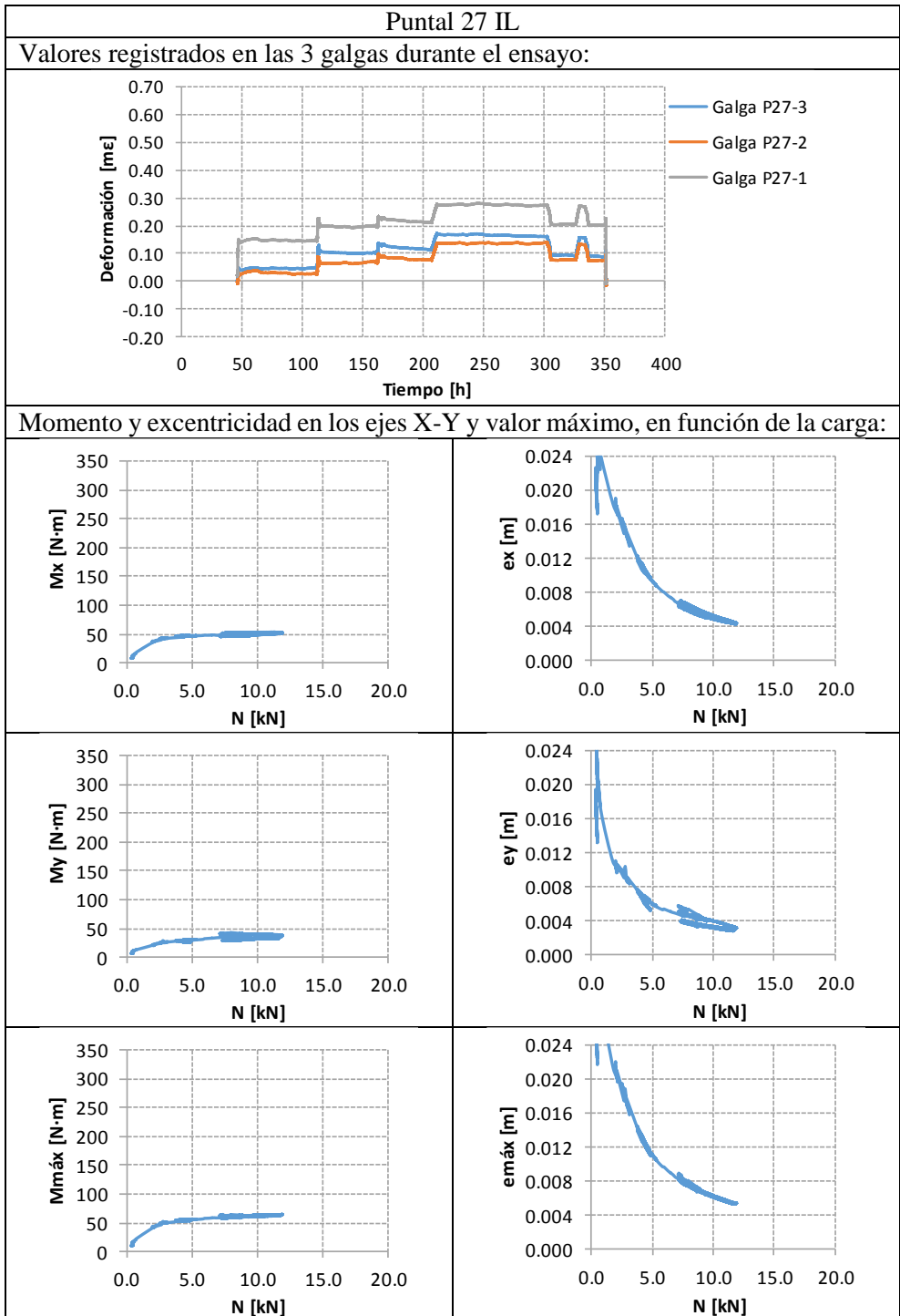
A1.5.2. Resultados

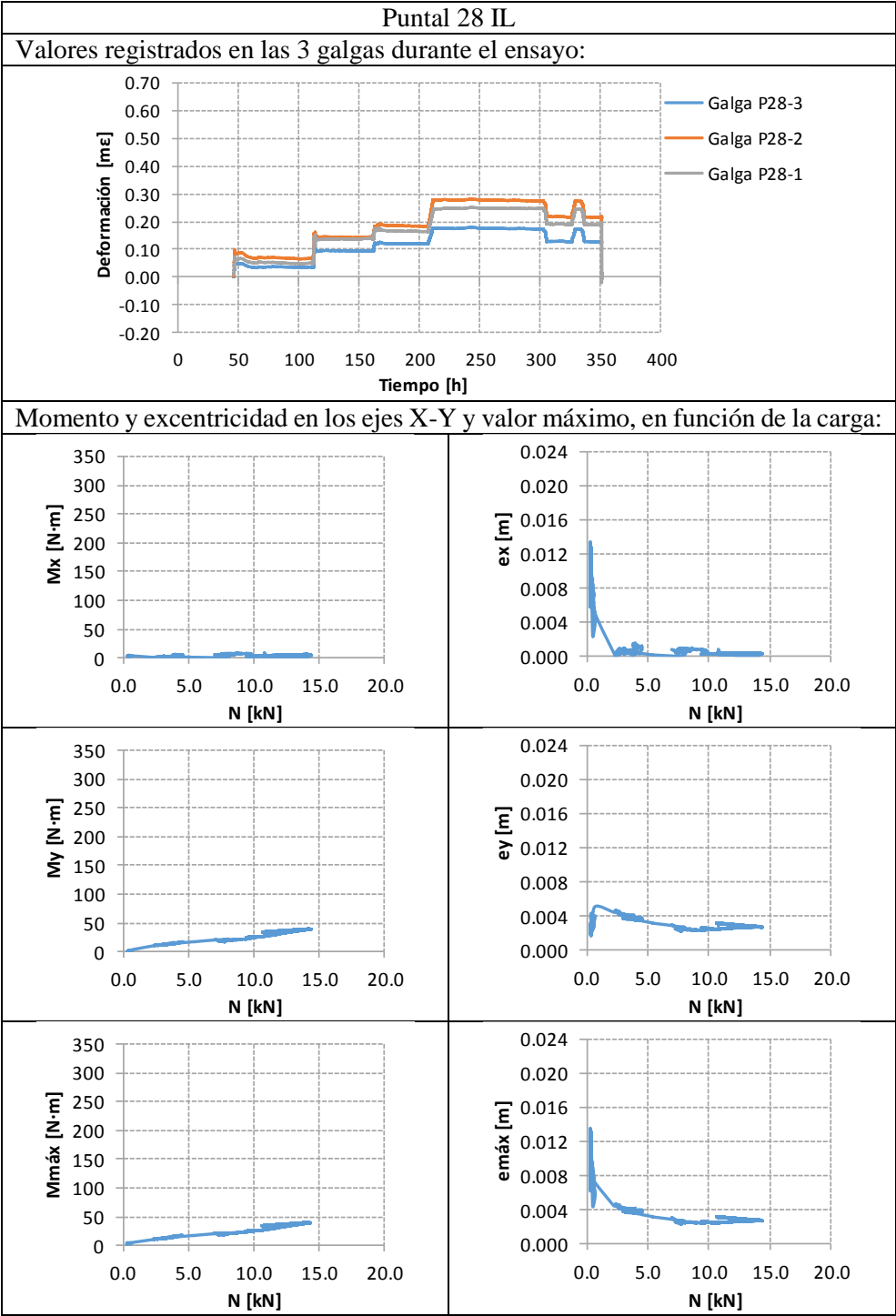
Los resultados obtenidos se muestran a continuación para cada uno de los puntales. Se muestran las deformaciones obtenidas de cada una de las galgas durante el ensayo y los momentos y excentricidades ($e = M/N$) de ejes X e Y, y sus valores máximos.

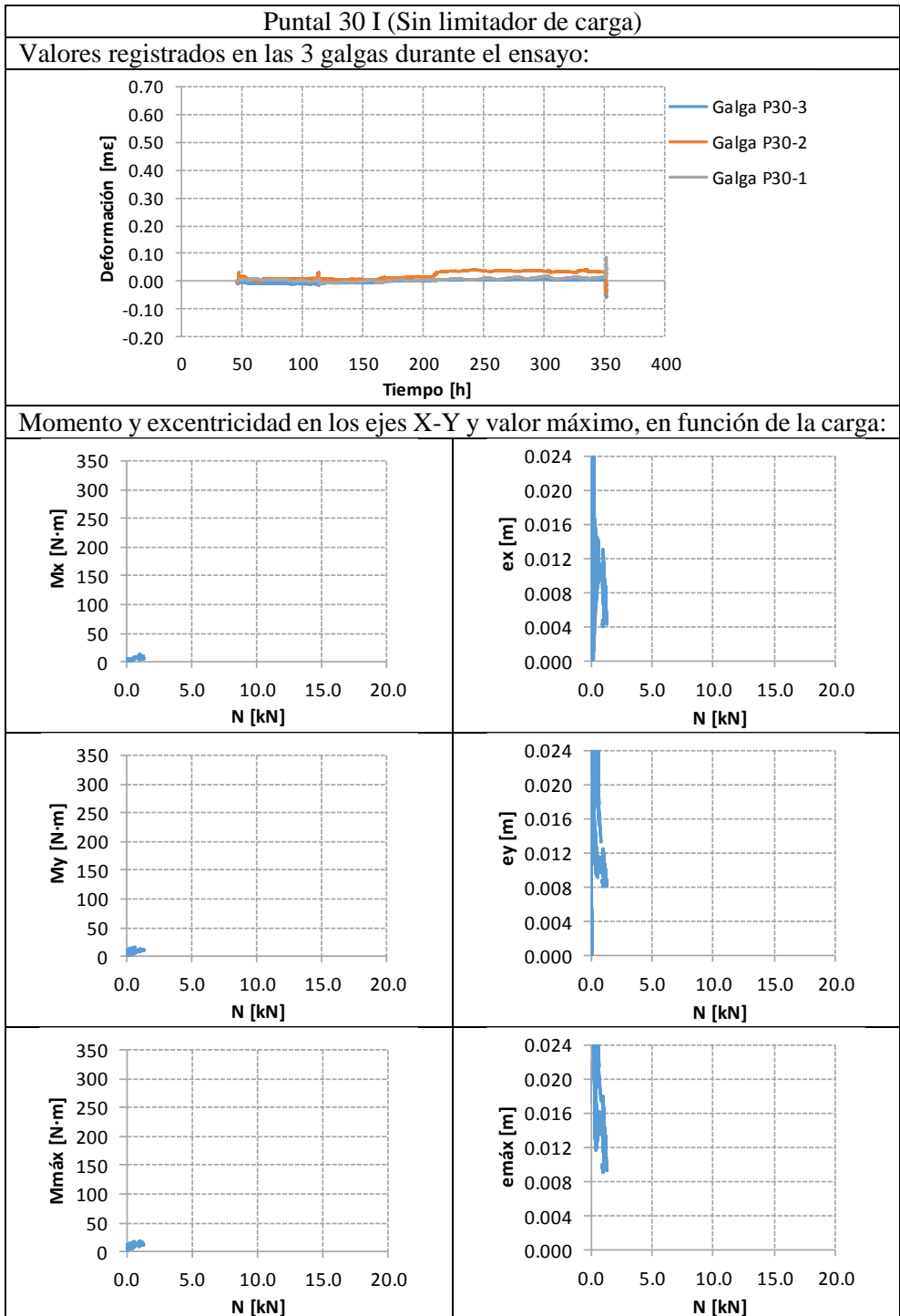


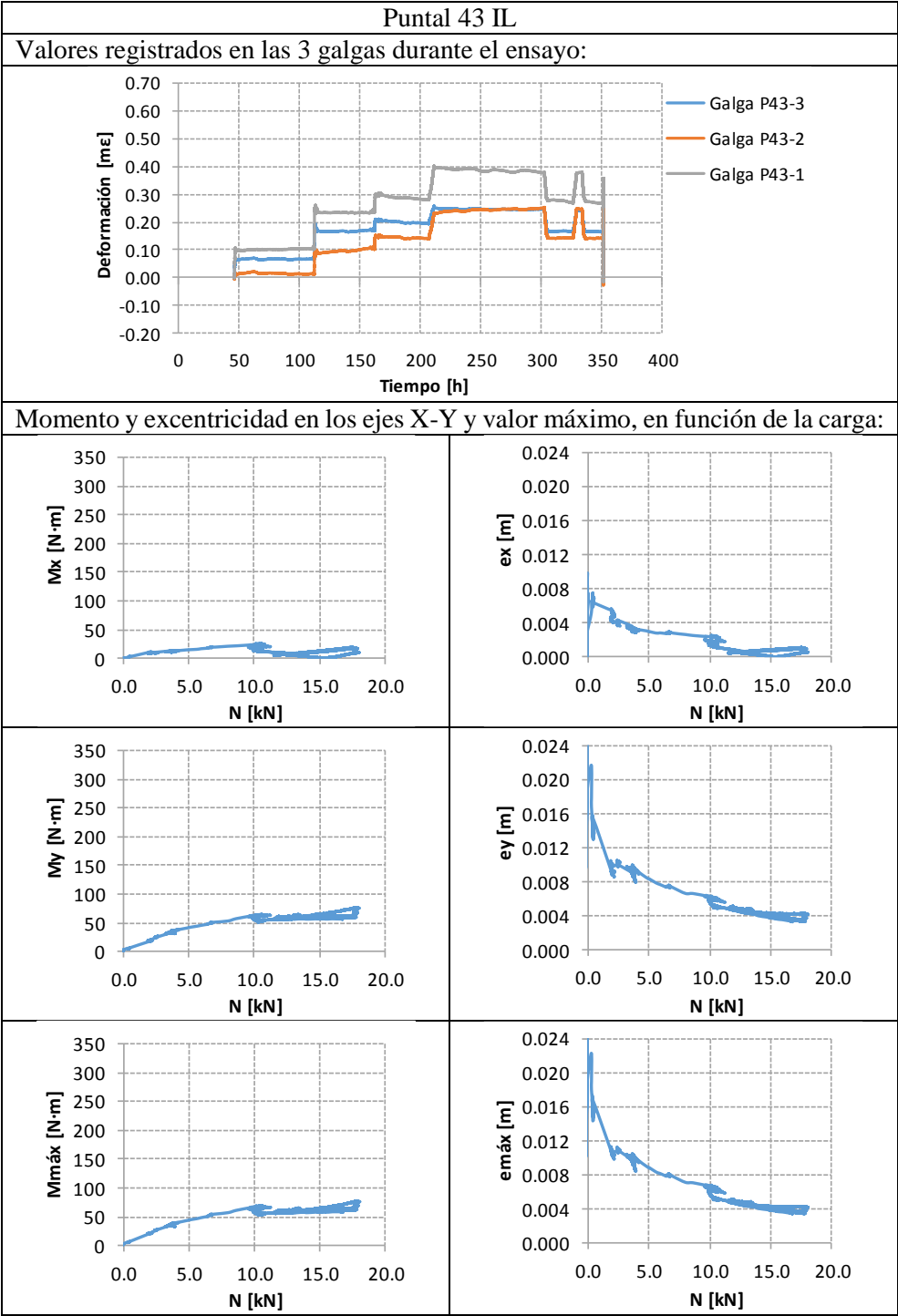


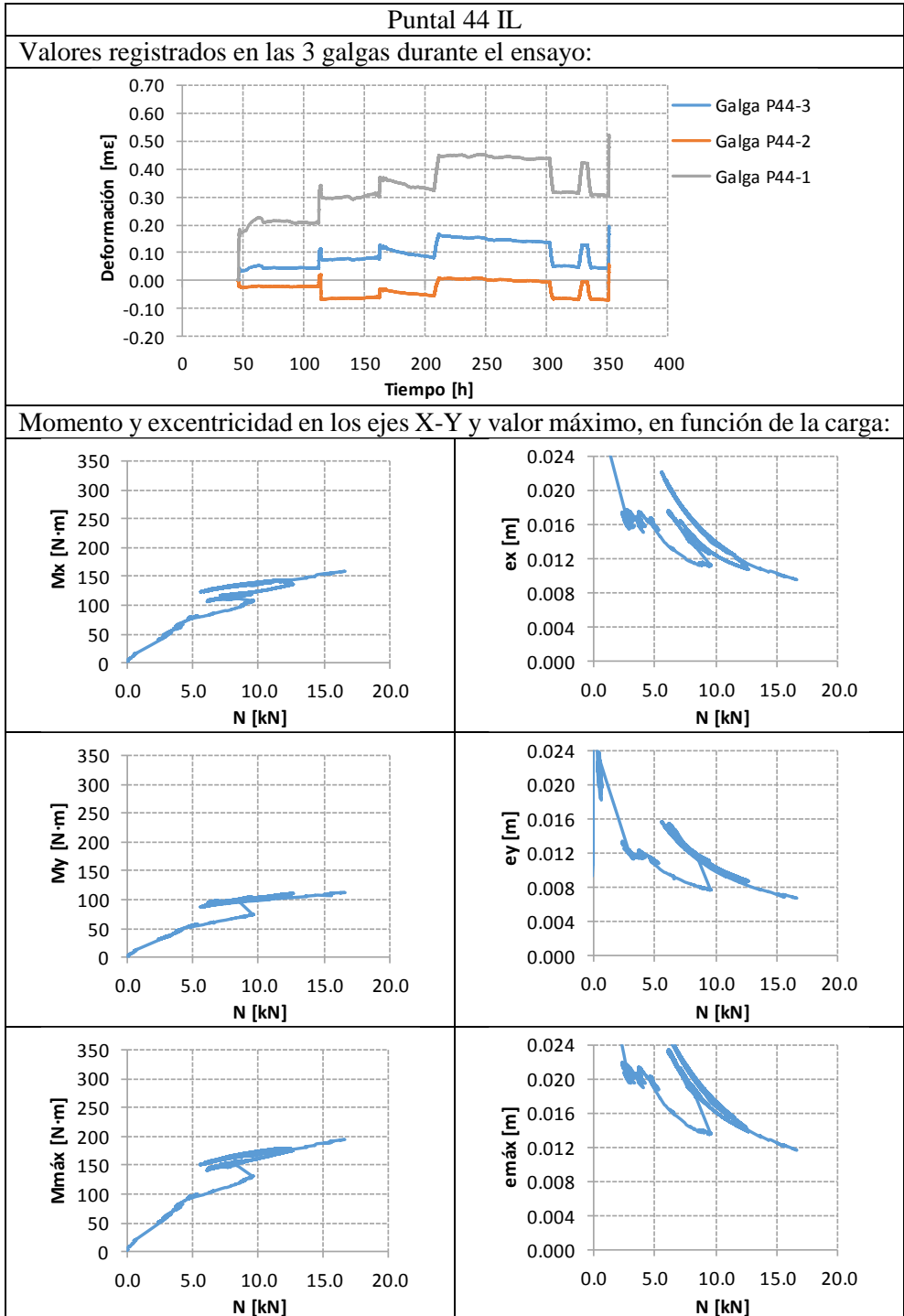


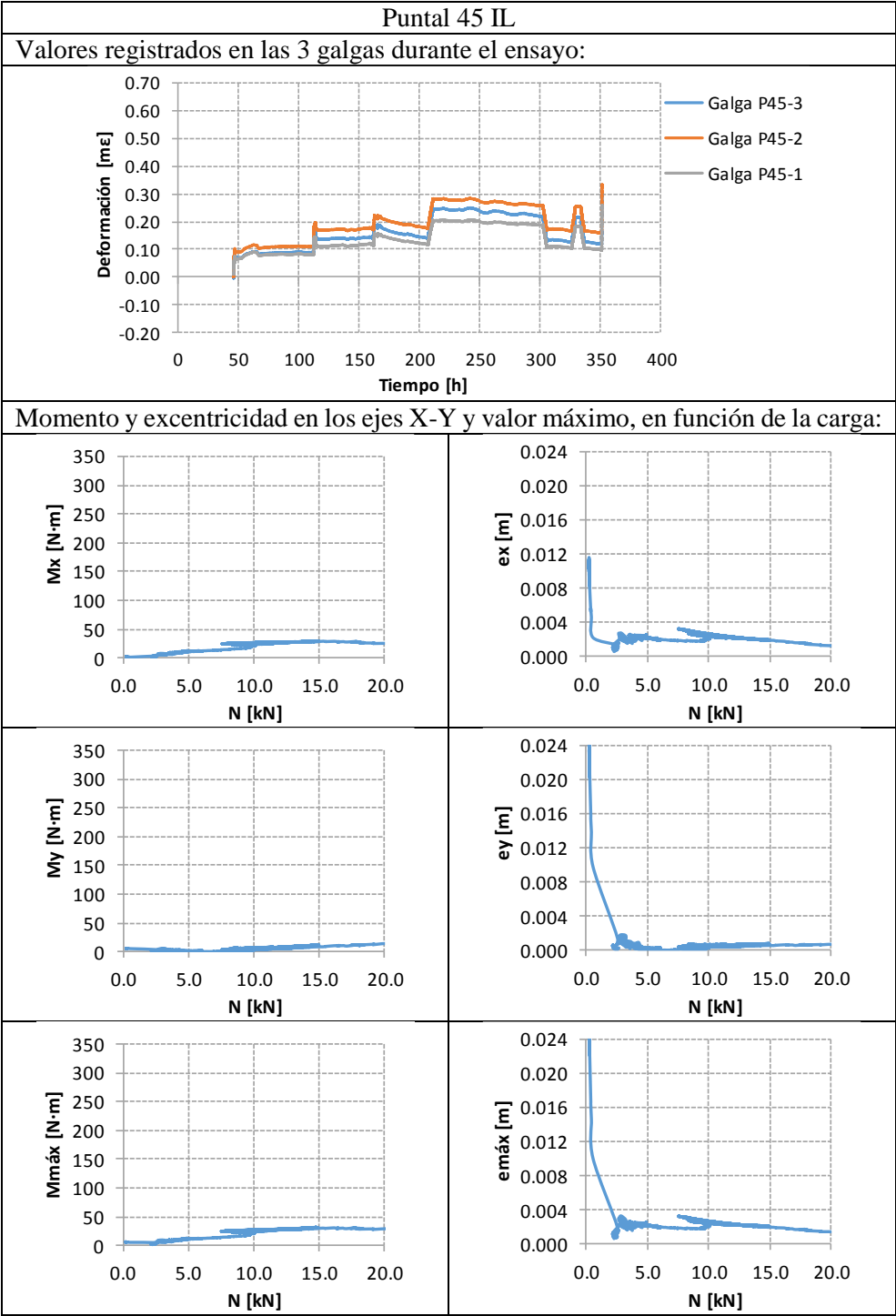


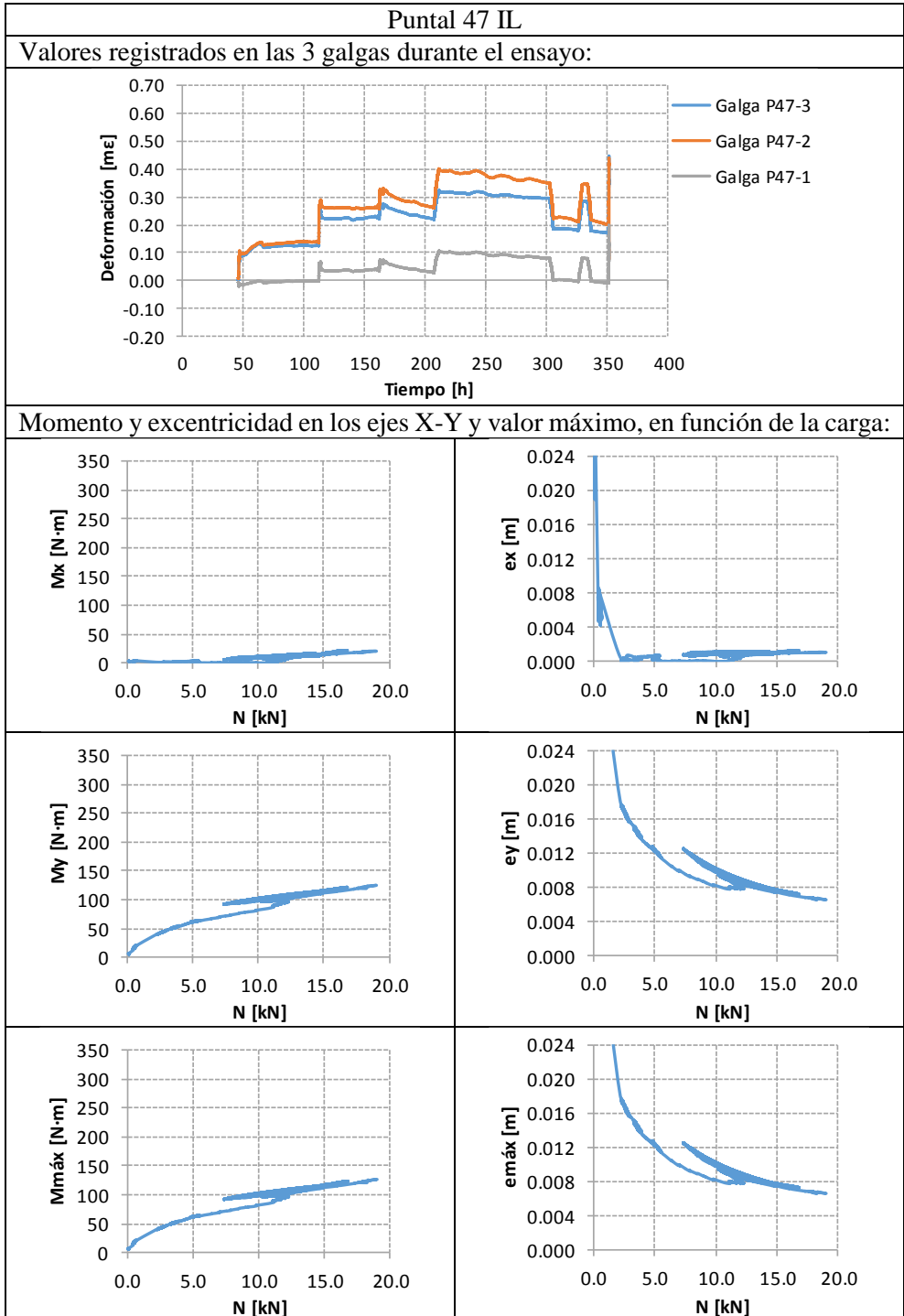


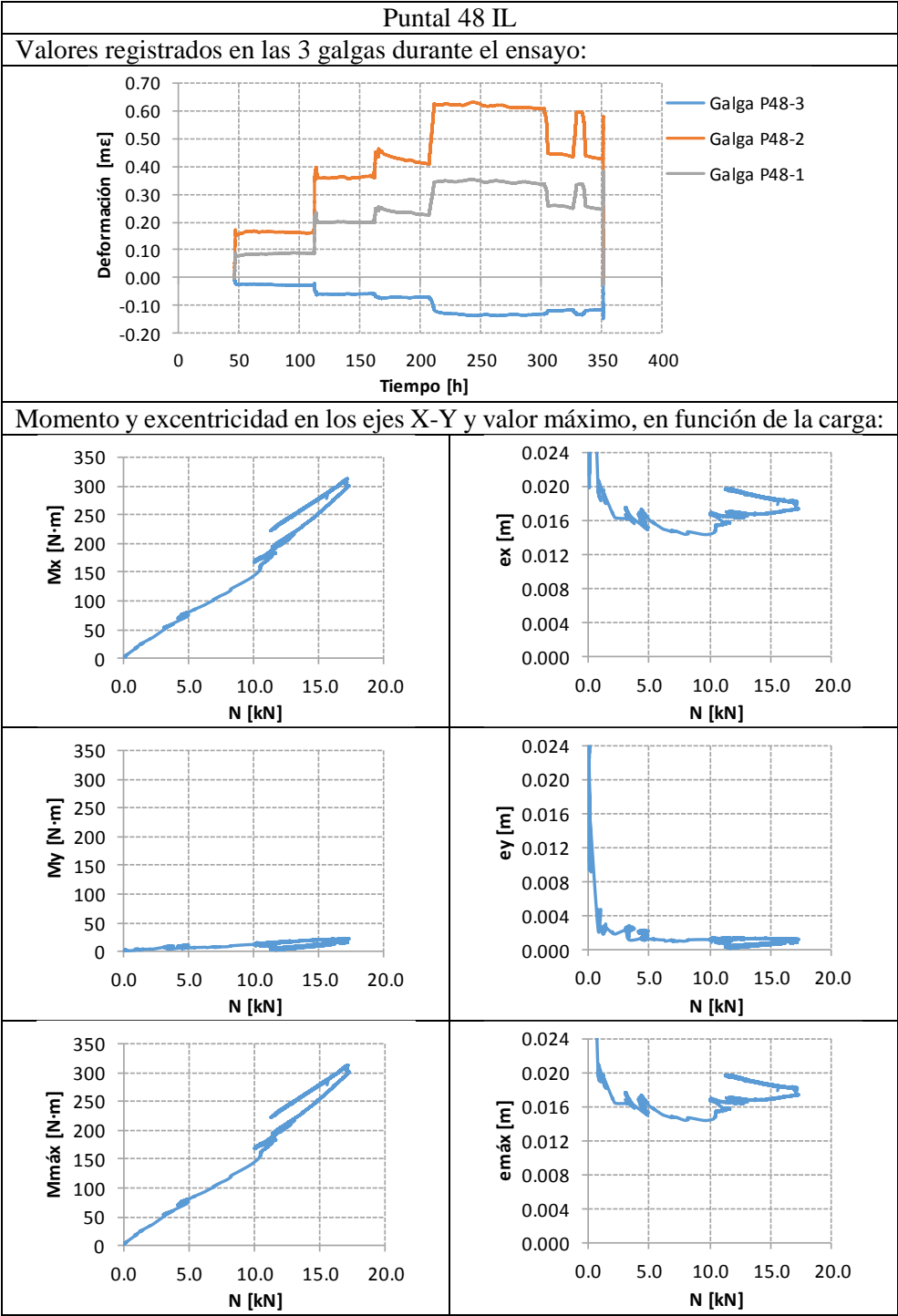


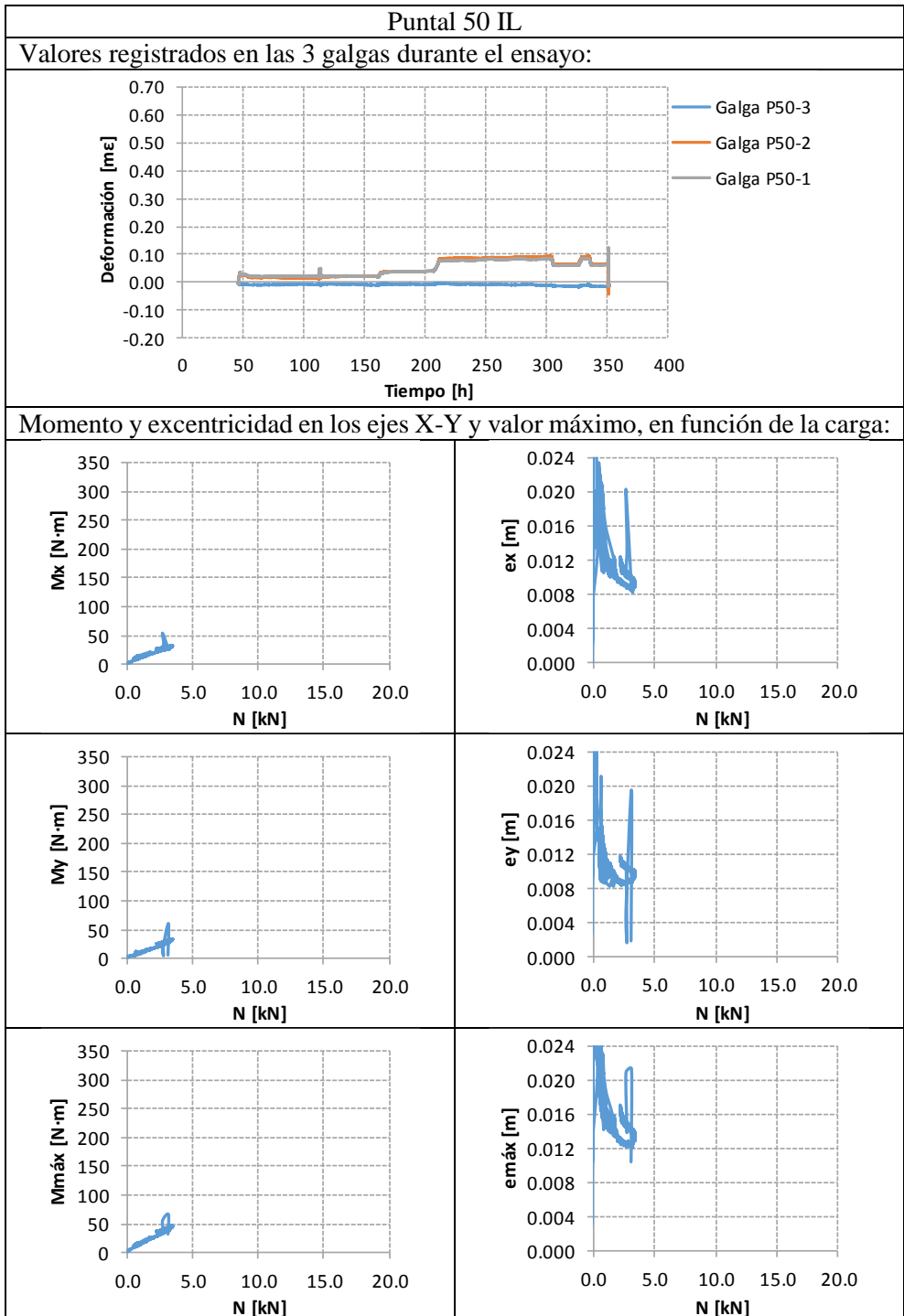


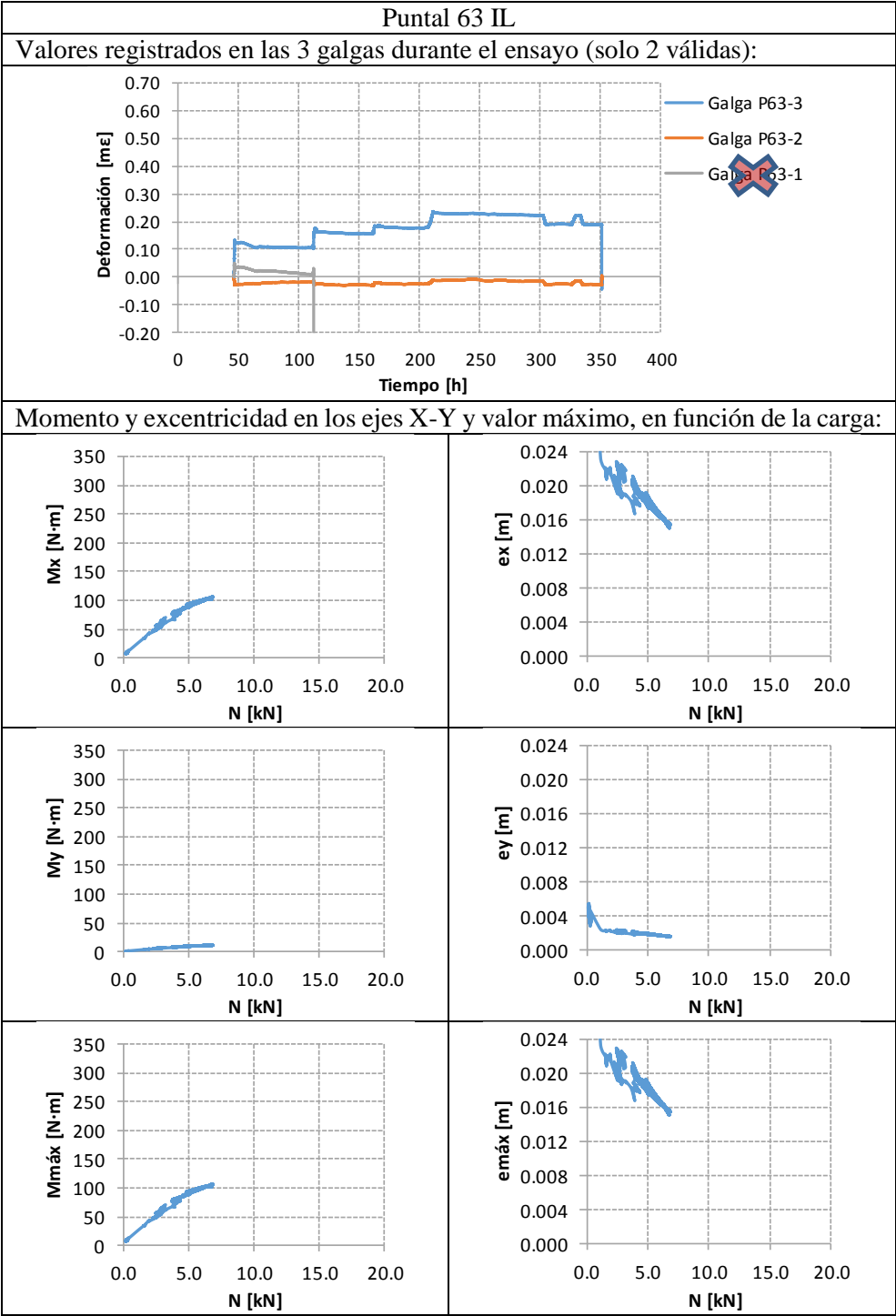


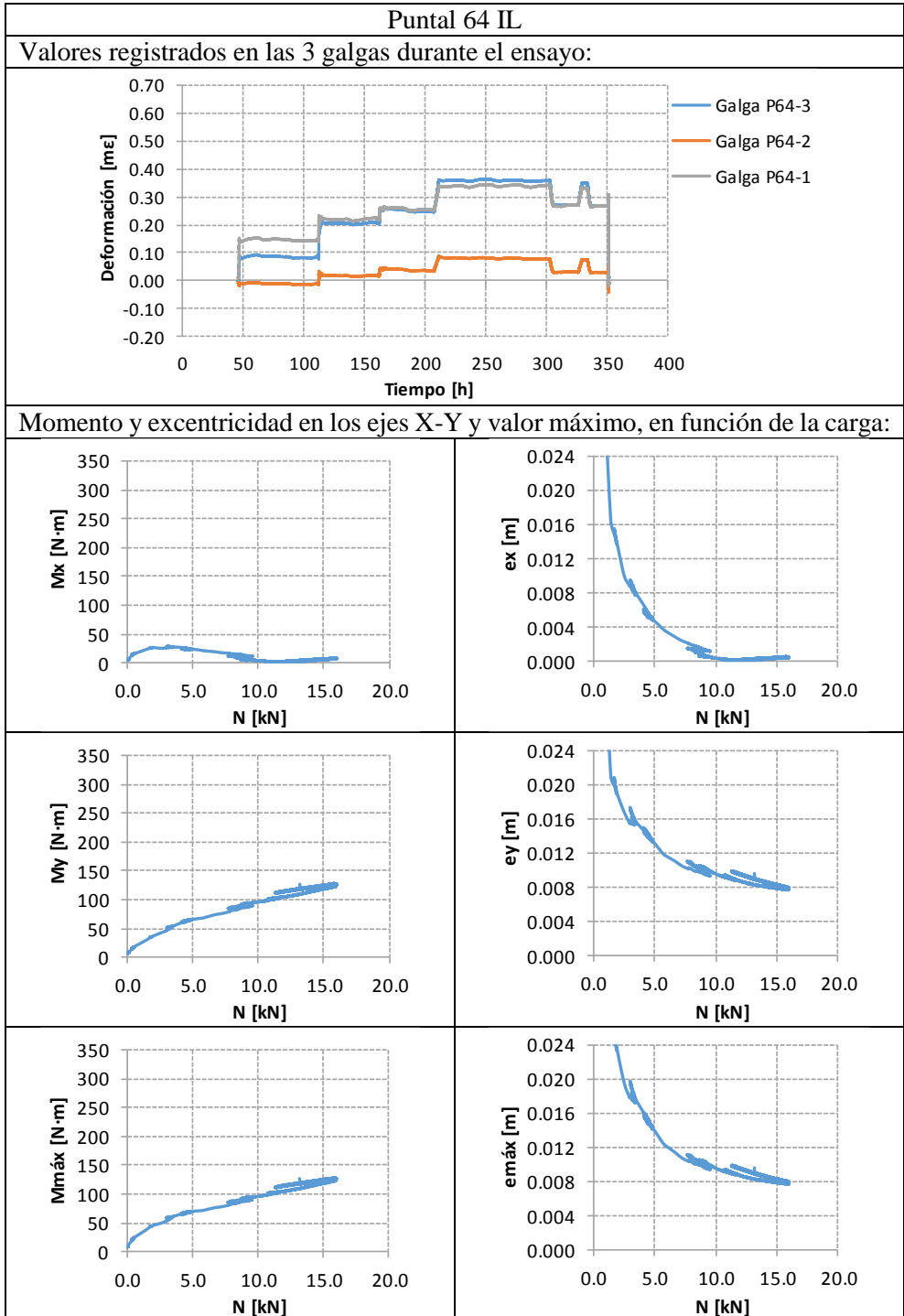


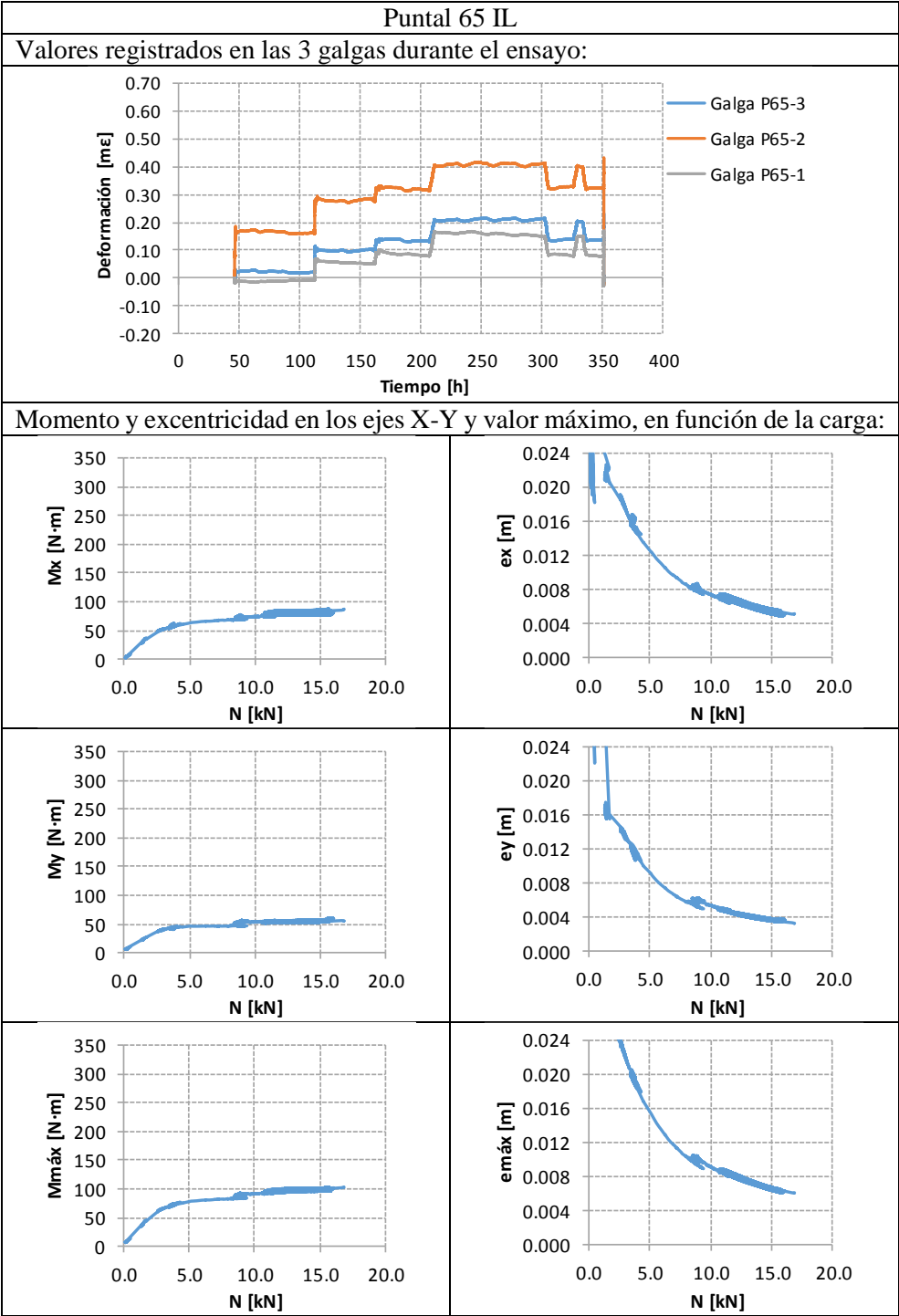


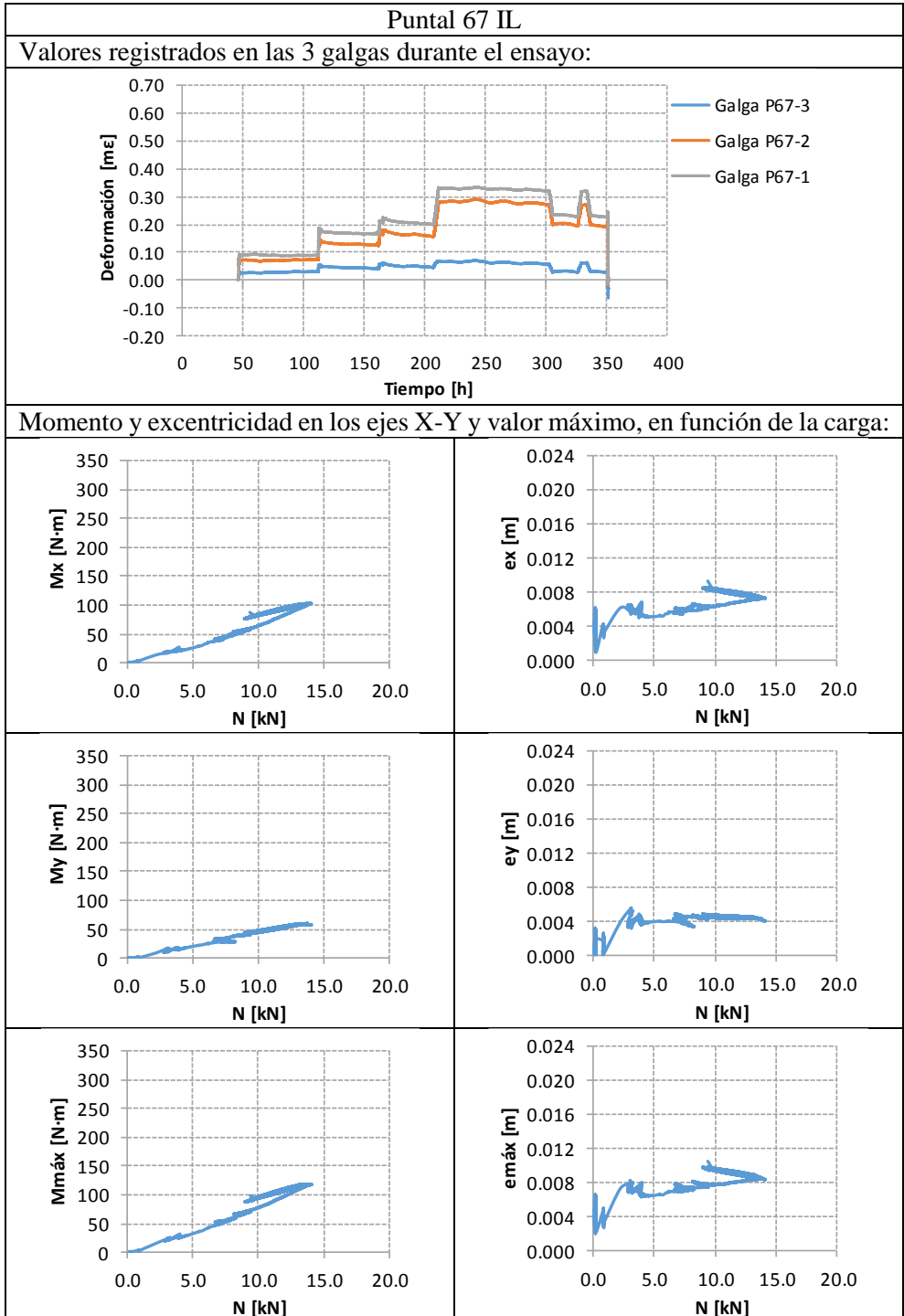


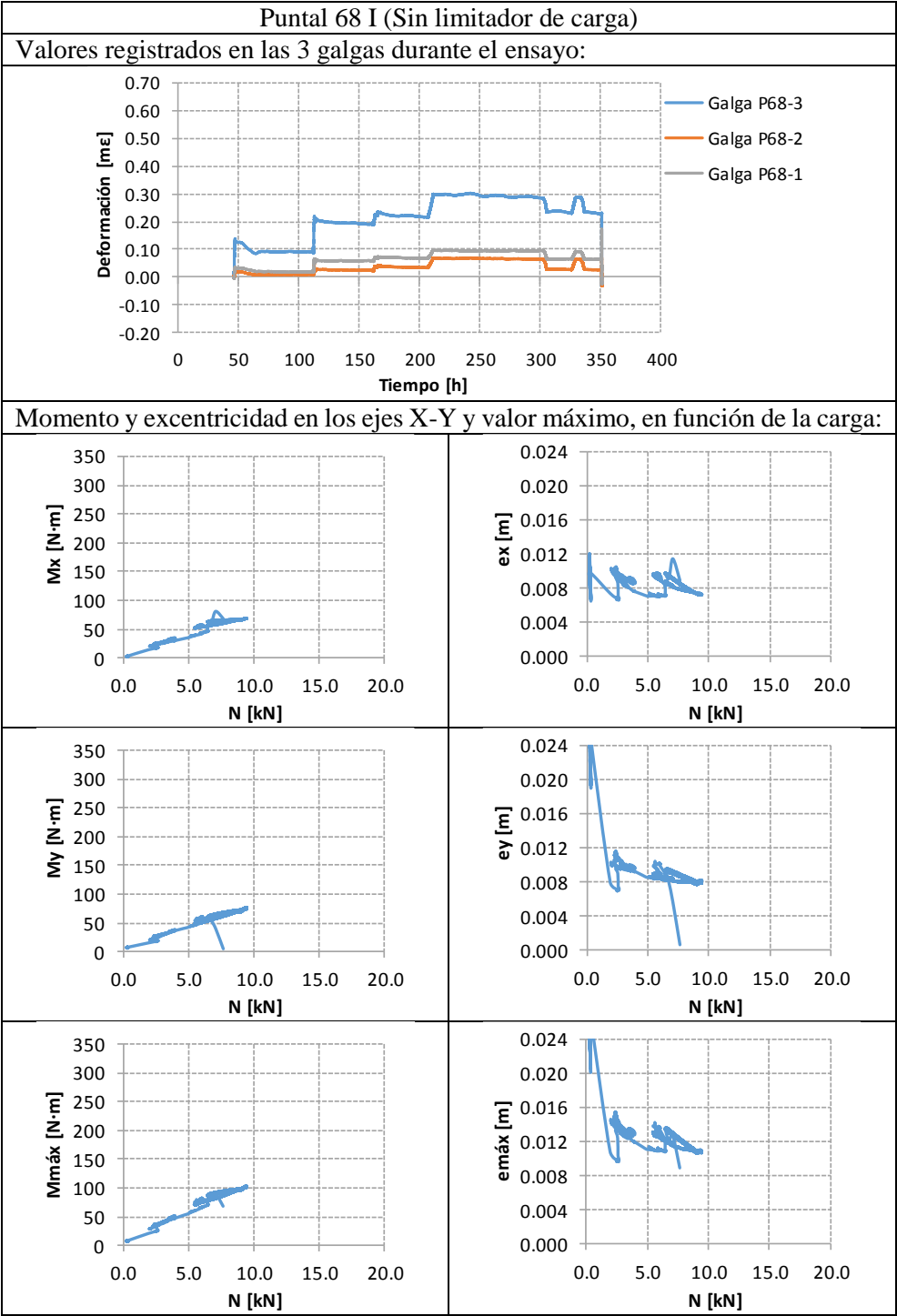


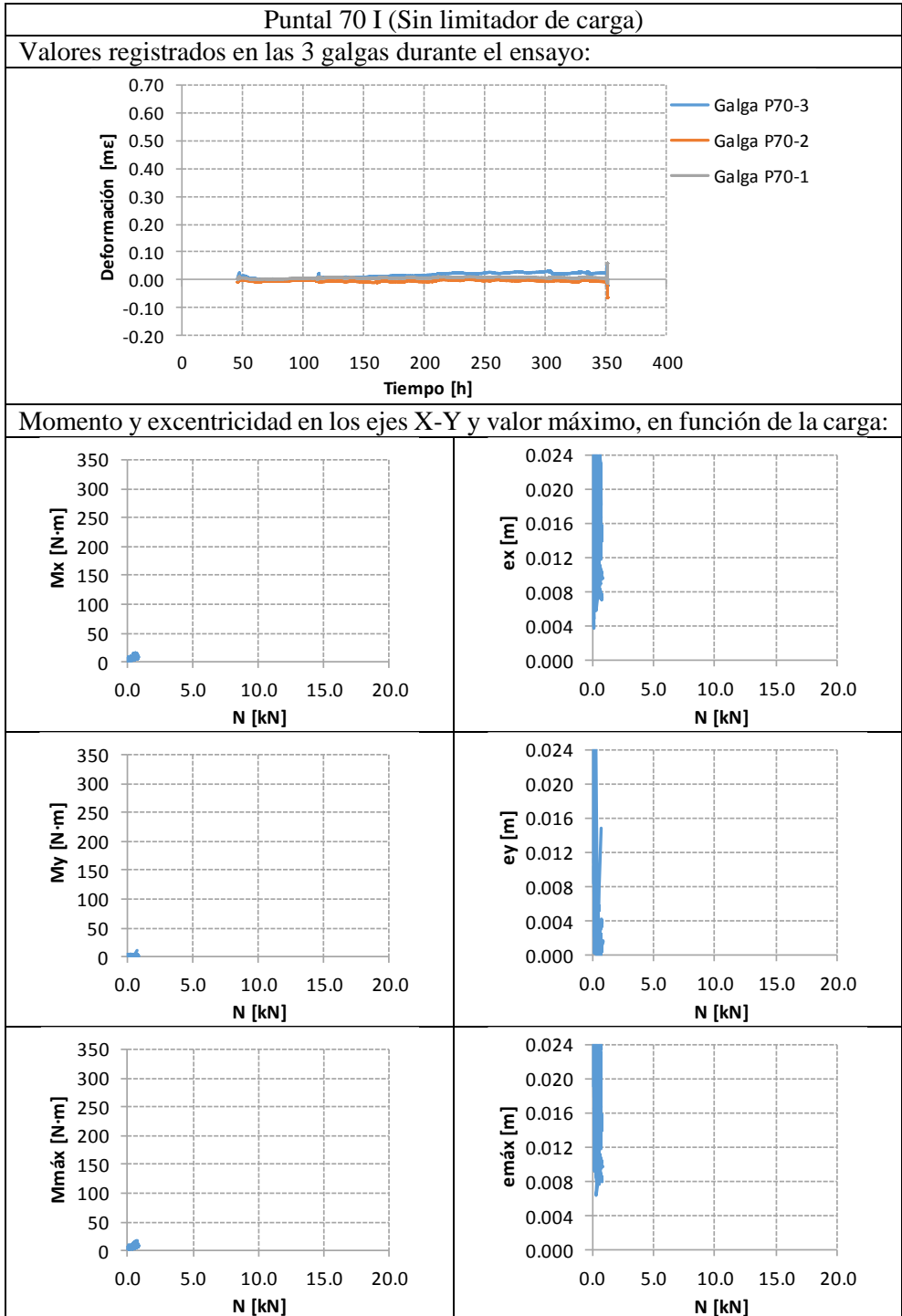












A1.6. Flechas en forjados

En este sub-apartado se presentan las flechas en forjados medidas por cada uno de los captadores de desplazamientos durante el ensayo. La Fig. A1.12 presenta, una vez más, el esquema donde aparece la ubicación de cada uno de los captadores.

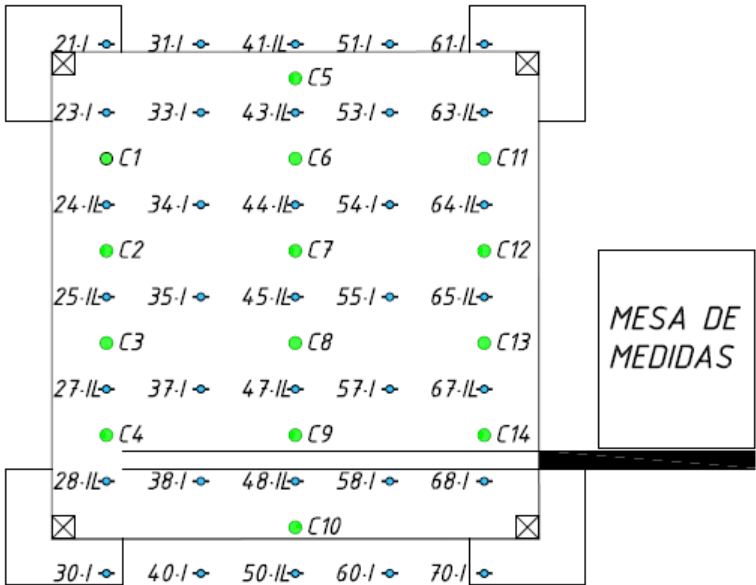
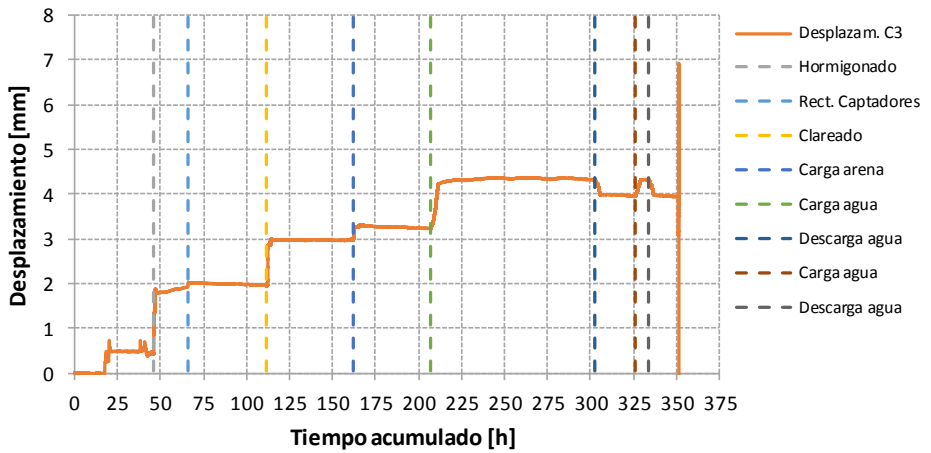
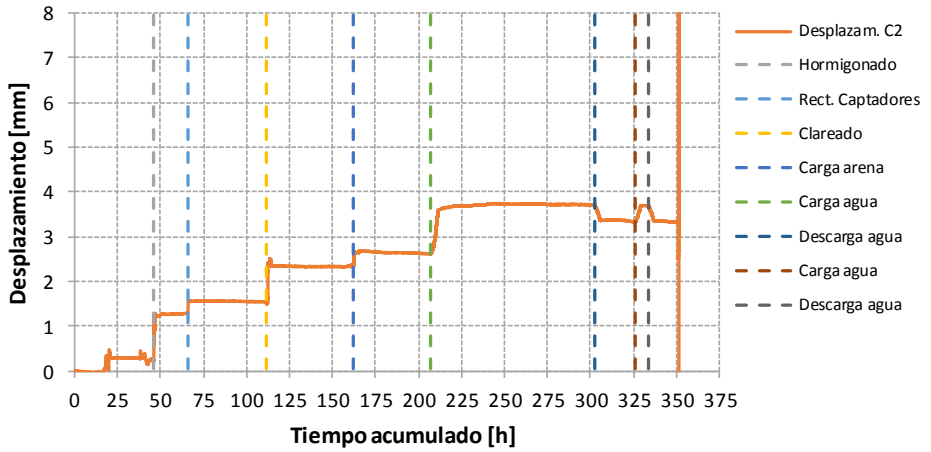
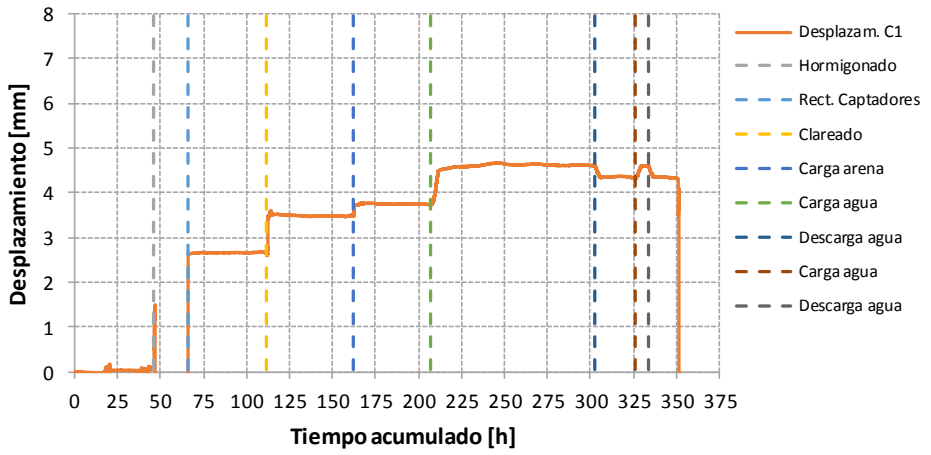
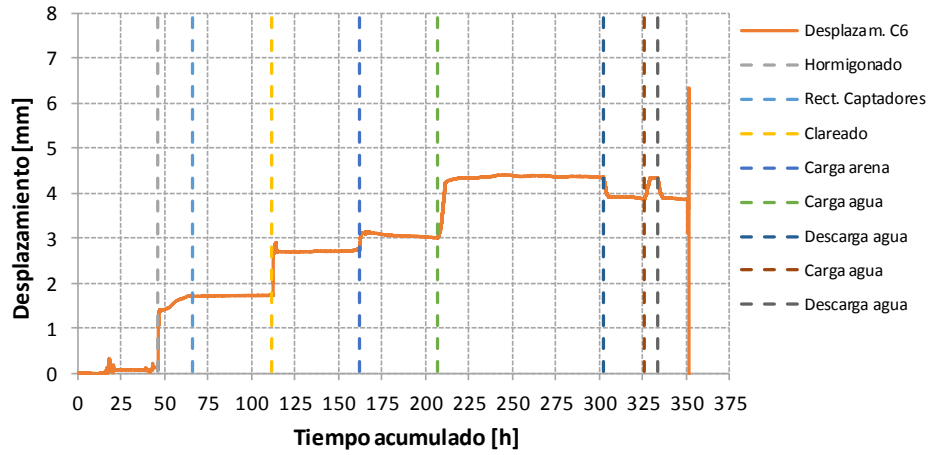
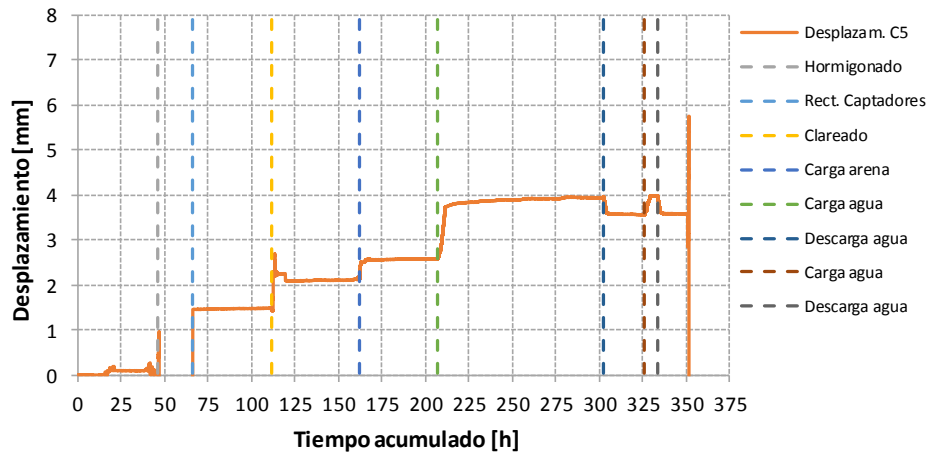
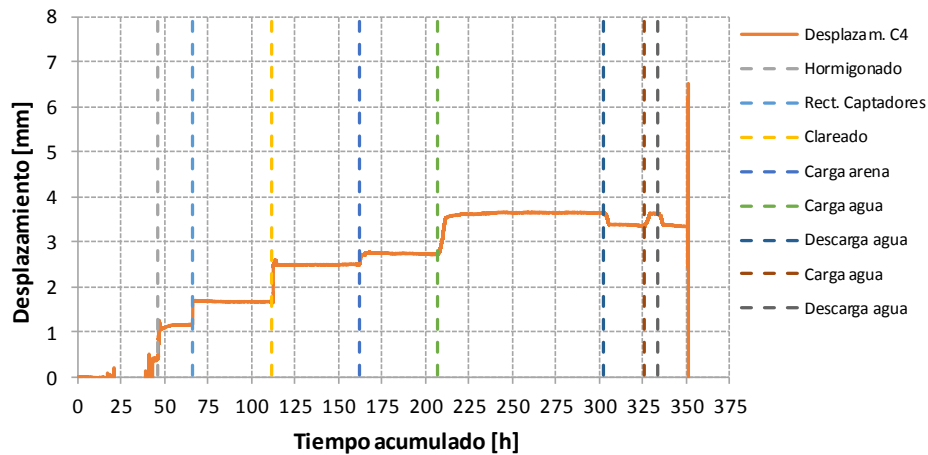
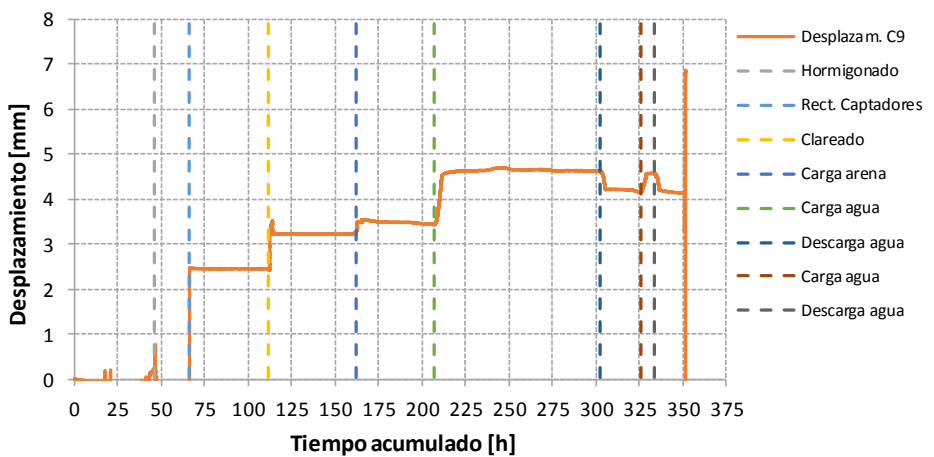
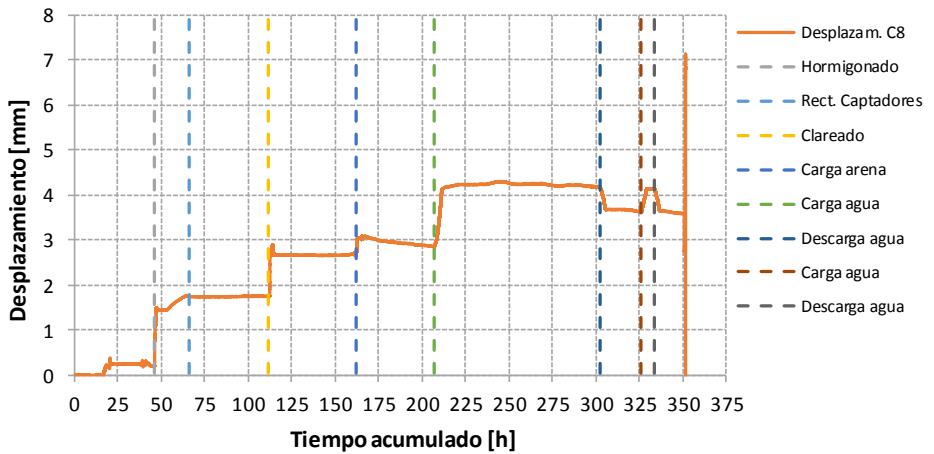
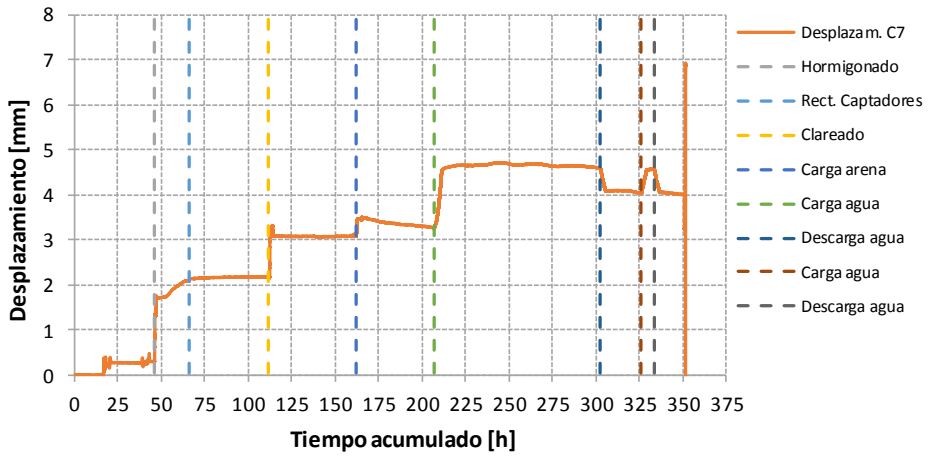


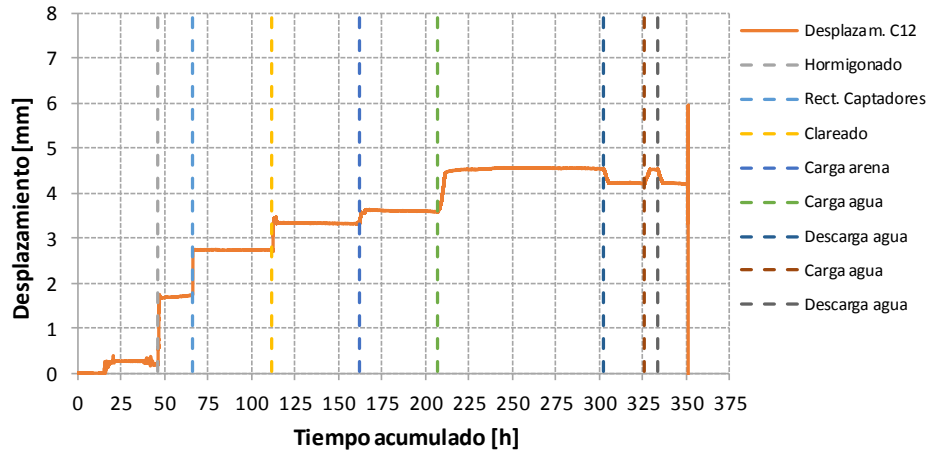
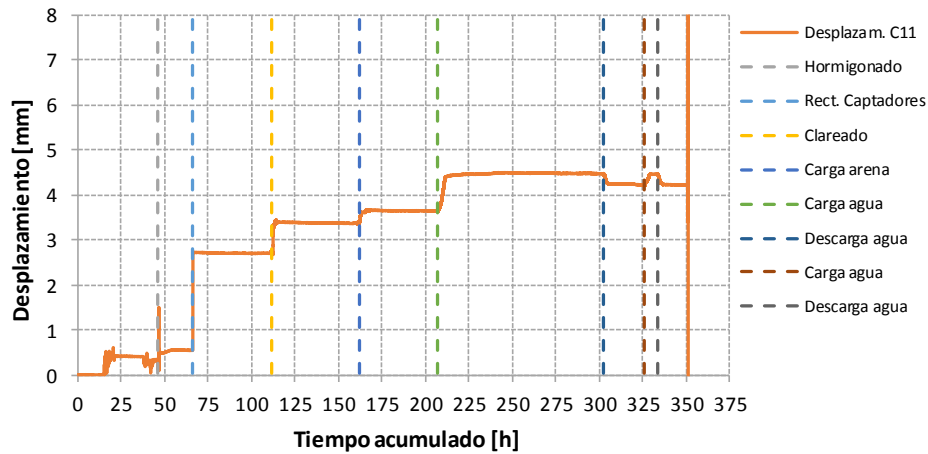
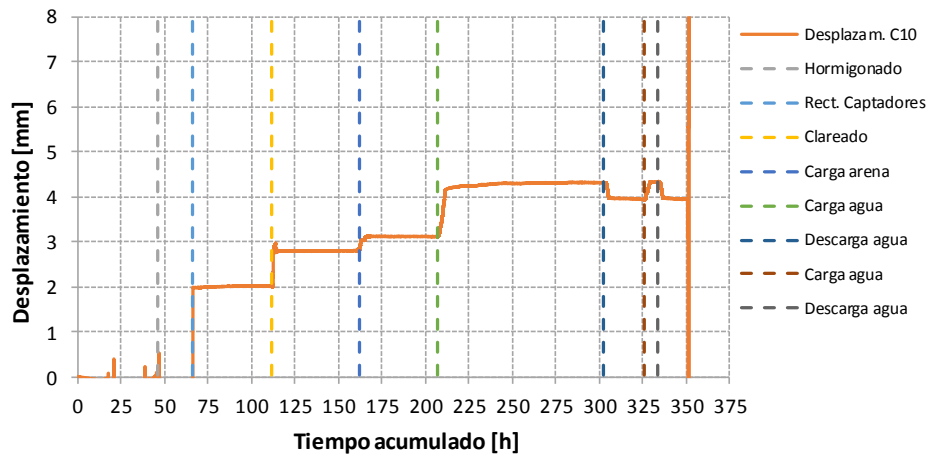
Fig. A1.12. Distribución de captadores.

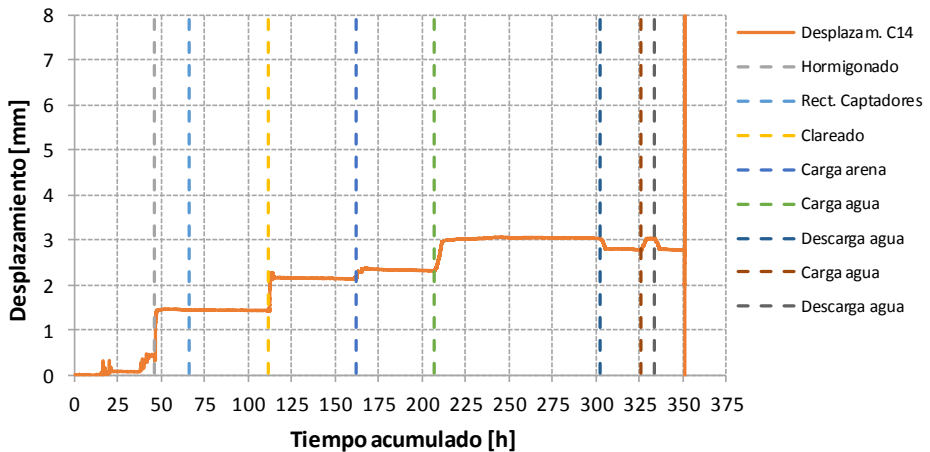
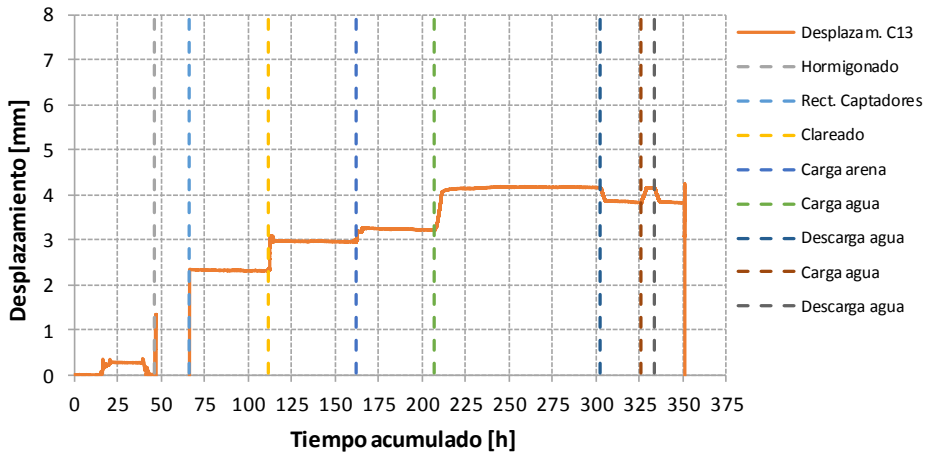
En cada uno de los gráficos puede apreciarse el momento en el que se realizaron las operaciones detalladas en apartado “5.3.2.2. Realización del ensayo”. De forma similar a la carga de los puntales, se puede observar como la flecha aumentó en las distintas operaciones constructivas (hormigonado, clareado, arena, agua). Además, ante situaciones de carga-descarga, se recuperó parte de la flecha y se volvió a deformar hasta niveles similares a la situación anterior a la descarga. Esto ocurrió incluso en aquellos limitadores de carga que presentaron comportamiento plástico. La flecha, en estos casos, es ligeramente superior respecto a una hipotética situación sin limitadores de carga debido al comportamiento plástico de dichos elementos. El ciclo descarga-carga-descarga de agua reprodujo los mismos valores de flecha de forma repetitiva, demostrando así la reutilización de limitadores de carga en puntales bajo condiciones reales.











A1.7. Curvas fuerza-desplazamiento de puntales

En este sub-apartado se presentan las curvas fuerza-desplazamiento (F-d) de los puntales. Para ello se ha representado la fuerza de cada puntal con el desplazamiento promedio medido en los dos captadores de desplazamiento más cercanos a dicho puntales. Es decir, según la Fig. A1.13, para determinar por ejemplo la curva fuerza-desplazamiento del punta 45, se escoge la carga de dicho puntal y el promedio de los desplazamientos registrados por los captadores C7 y C8. Seguidamente, se presentan los resultados obtenidos.

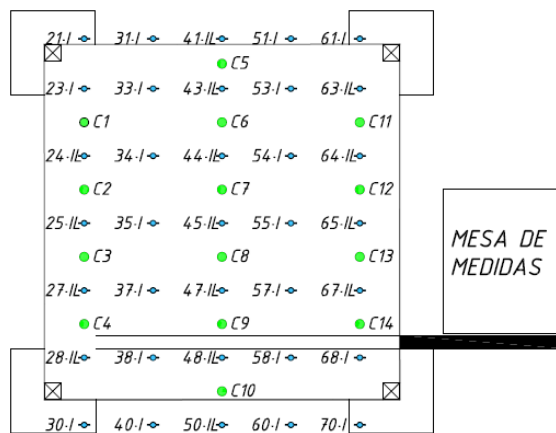
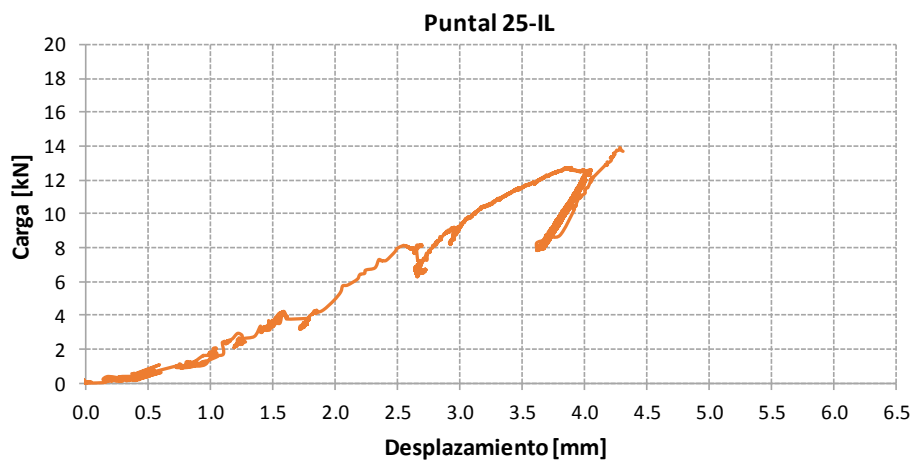
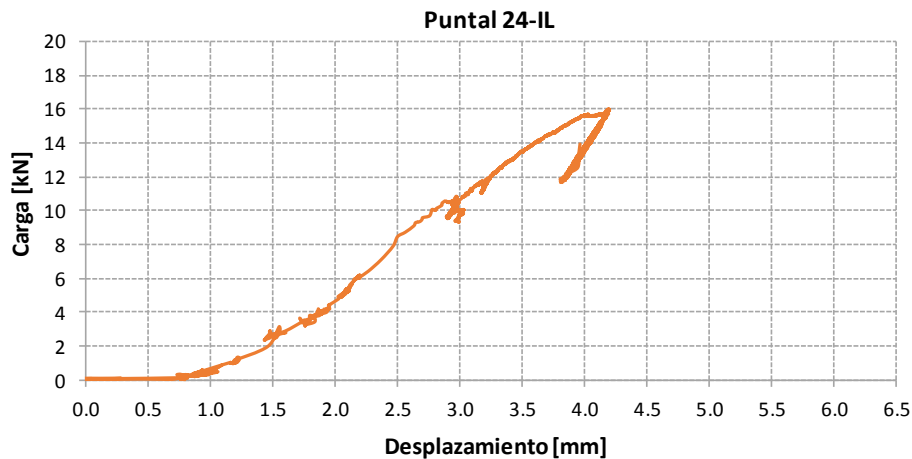
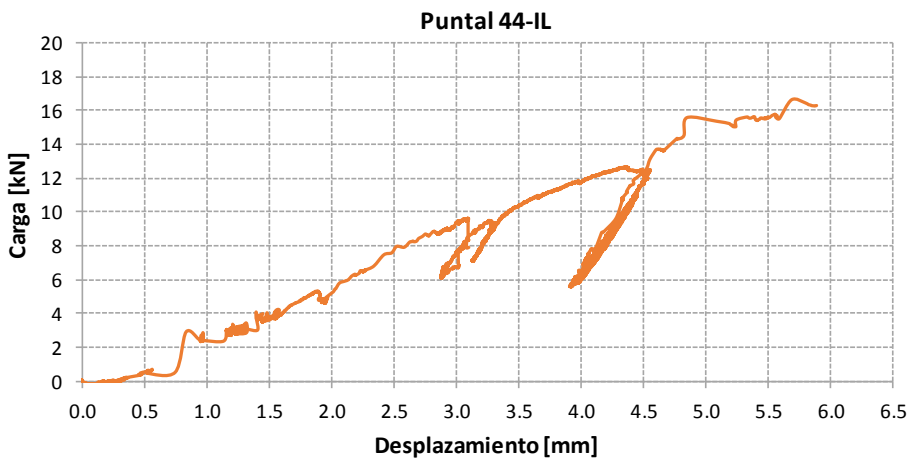
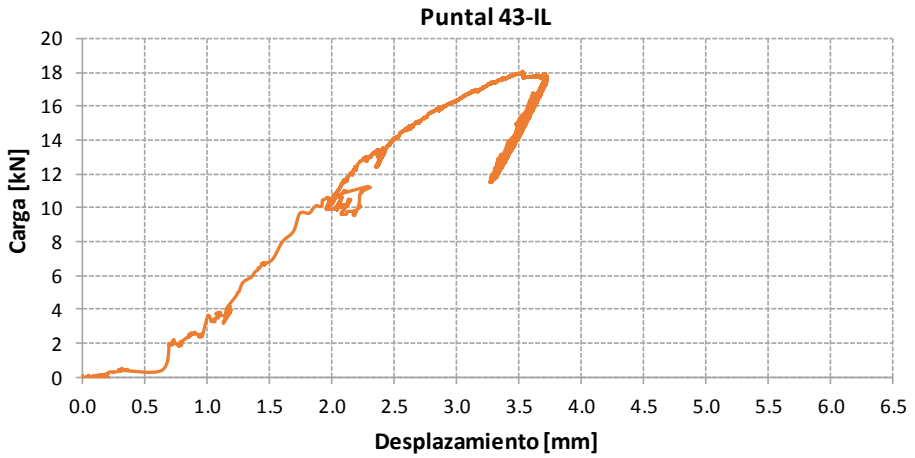
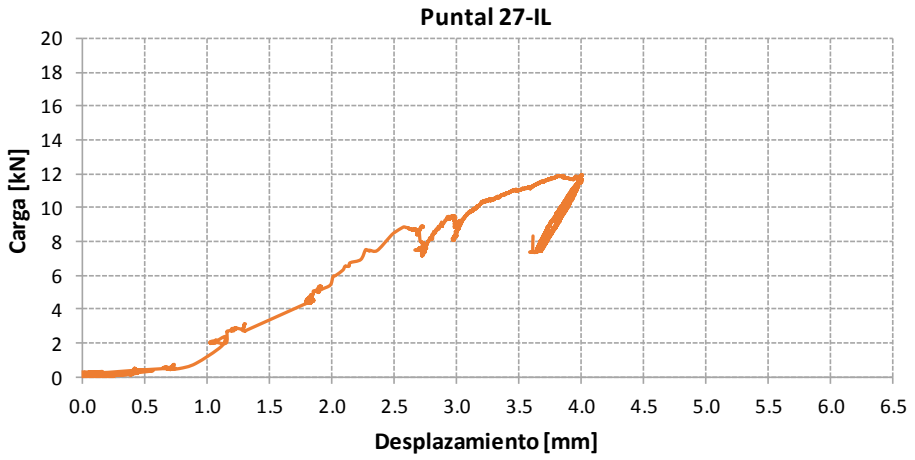
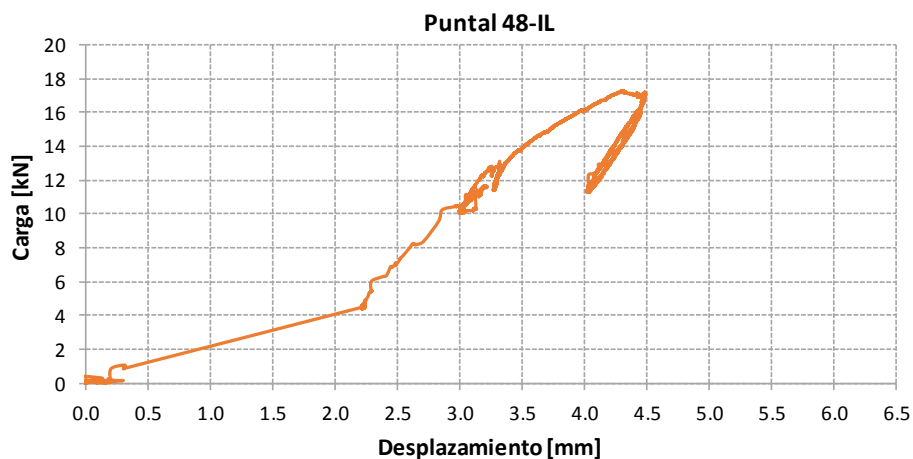
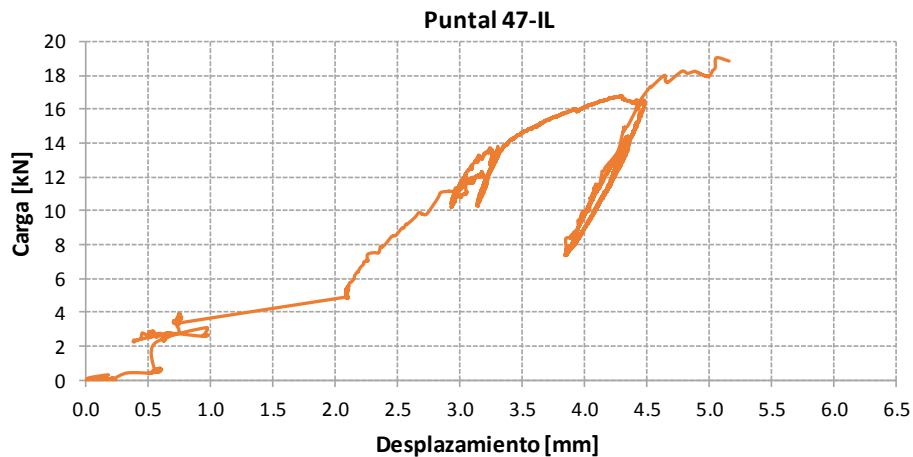
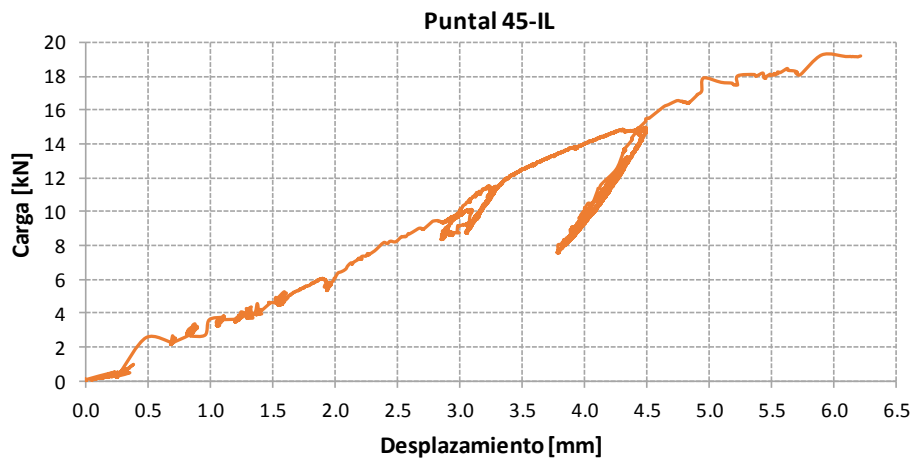
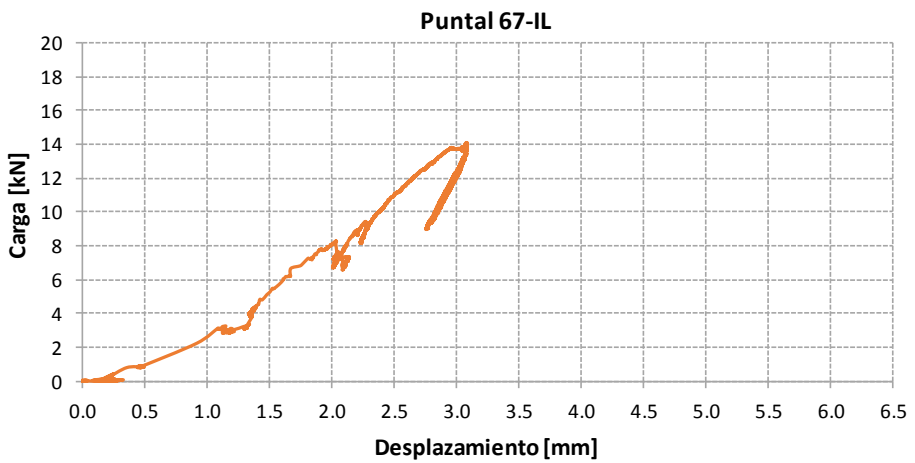
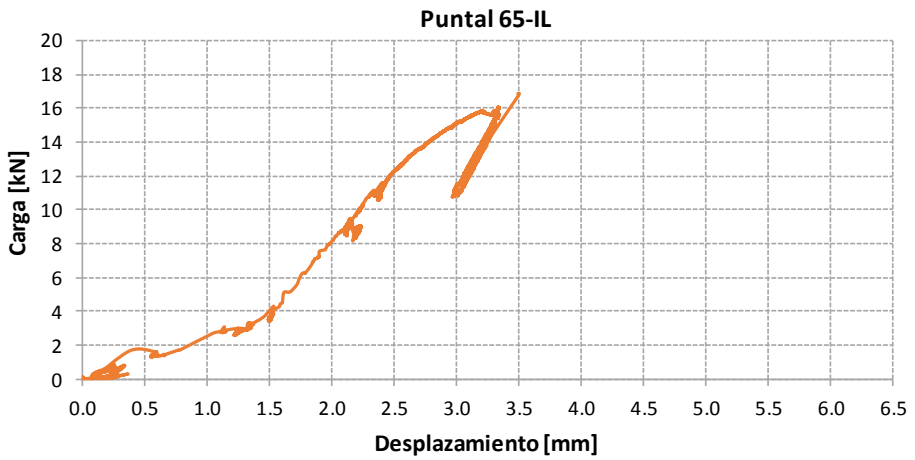
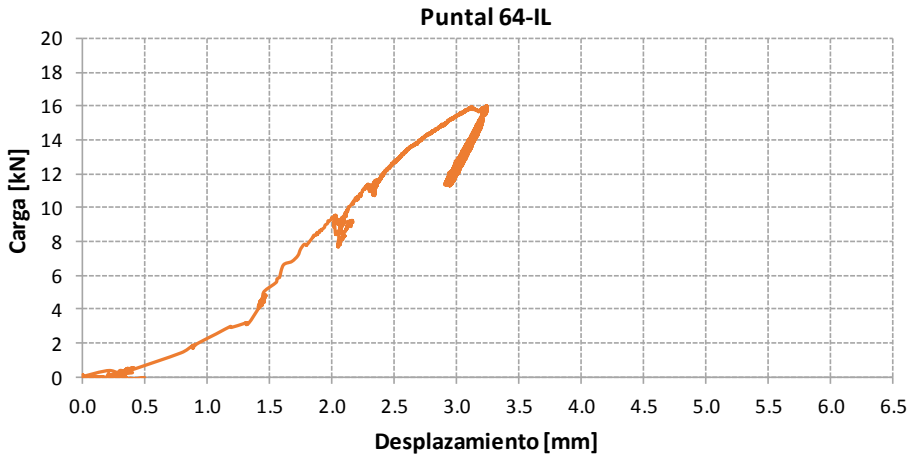


Fig. A1.13. Distribución de puntales y captadores.









23-I	43-IL	63-IL
24-IL	44-IL	64-IL
25-IL	45-IL	65-IL
27-IL	47-IL	67-IL
28-IL	48-IL	68-I
30-I	50-IL	70-I

CARGA INICIAL = 7,6 kN



23-I	43-IL	63-IL
24-IL	44-IL	64-IL
25-IL	45-IL	65-IL
27-IL	47-IL	67-IL
28-IL	48-IL	68-I
30-I	50-IL	0,5 kN 70-I

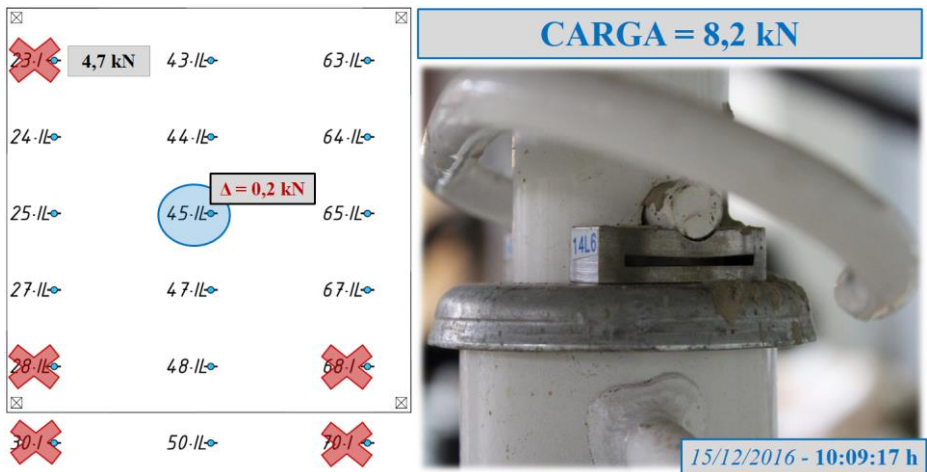
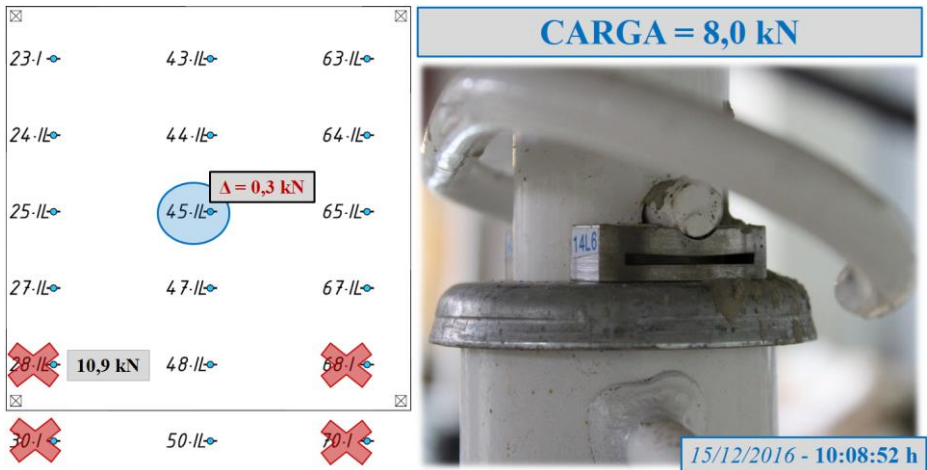
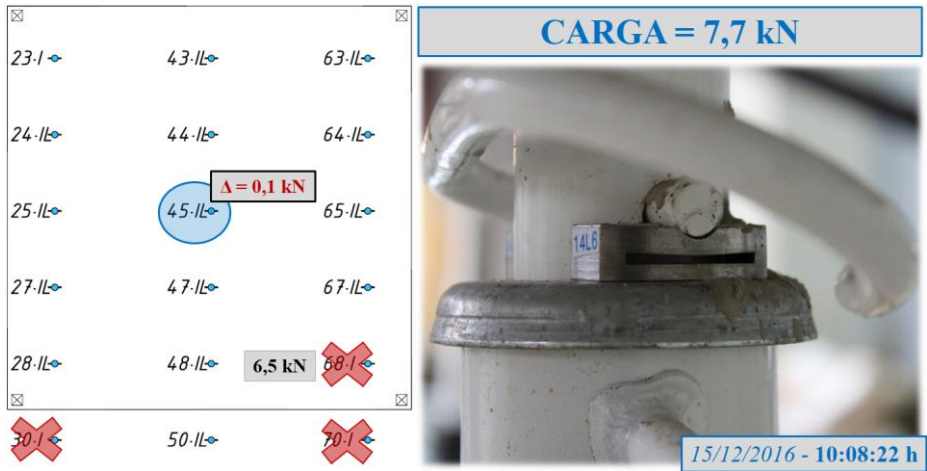
CARGA = 7,6 kN

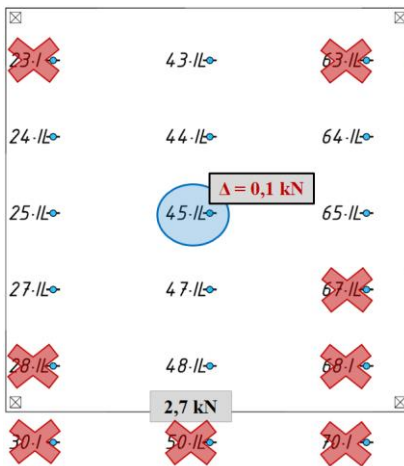
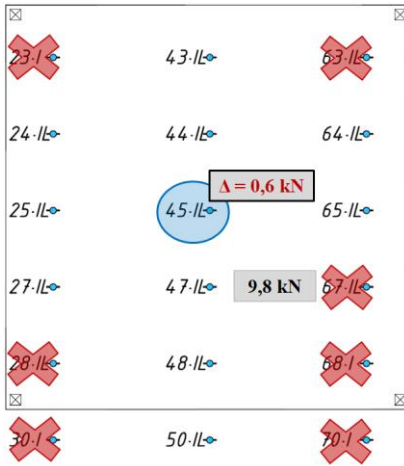
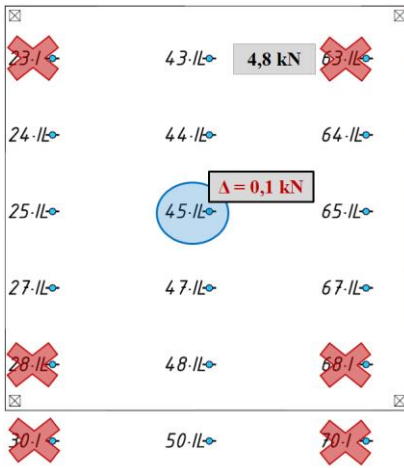


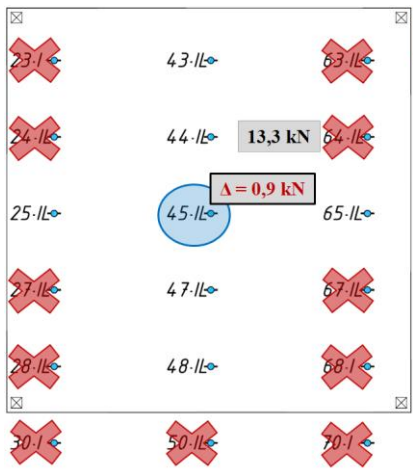
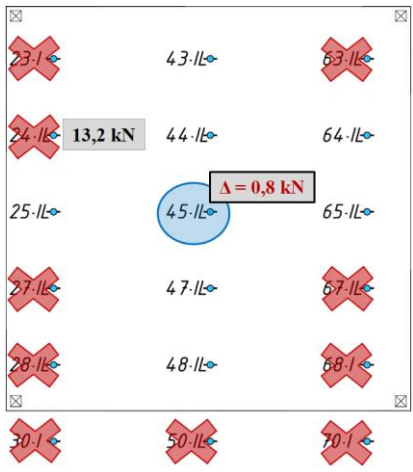
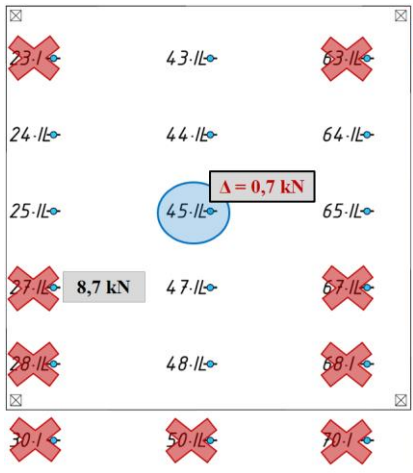
23-I	43-IL	63-IL
24-IL	44-IL	64-IL
25-IL	45-IL	65-IL
27-IL	47-IL	67-IL
28-IL	48-IL	68-I
30-I	1,0 kN 50-IL	70-I

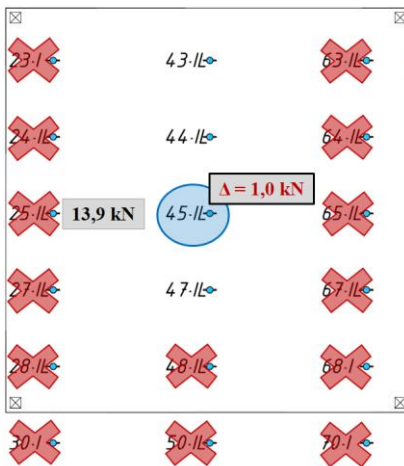
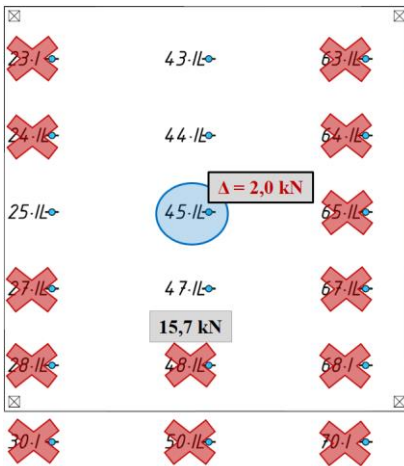
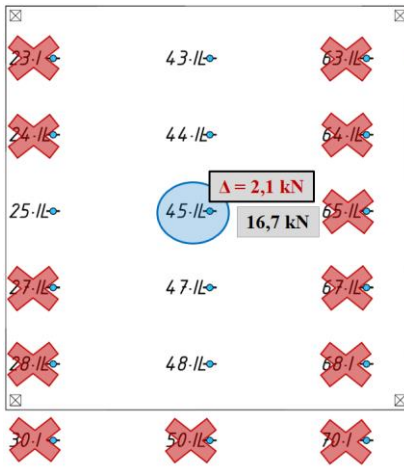
CARGA = 7,6 kN

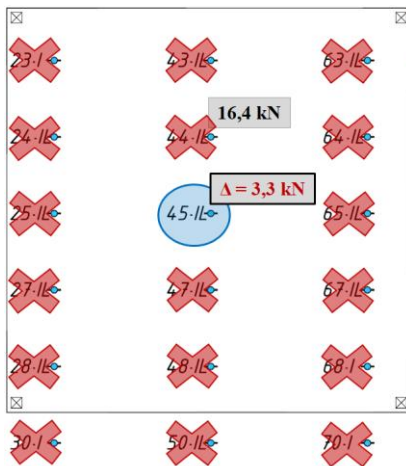
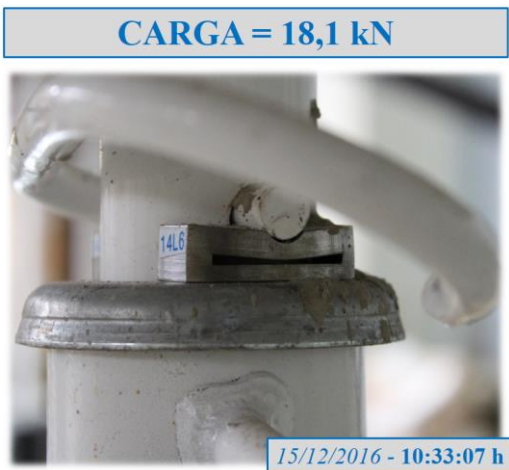
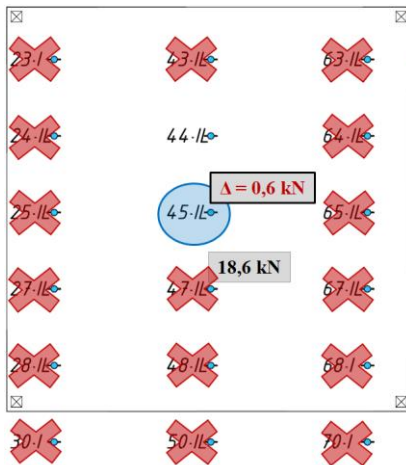
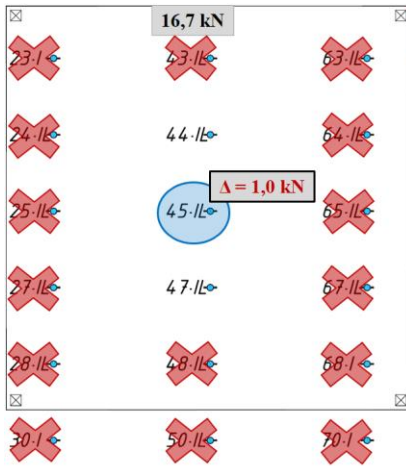


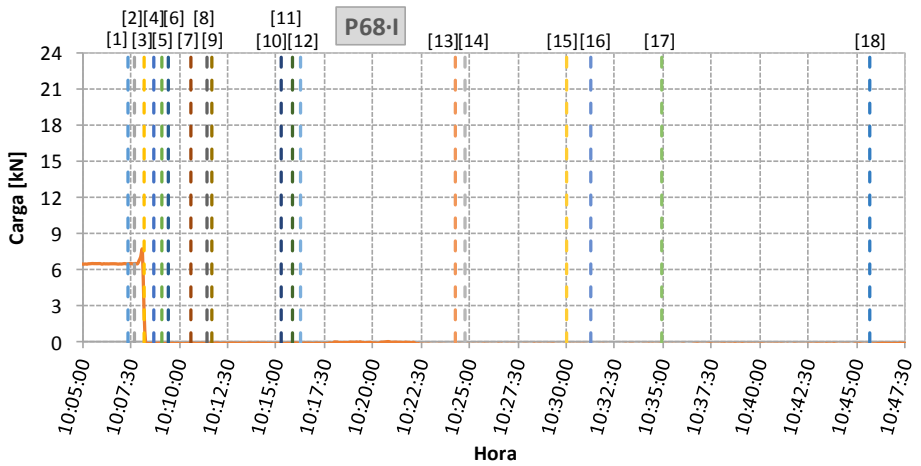
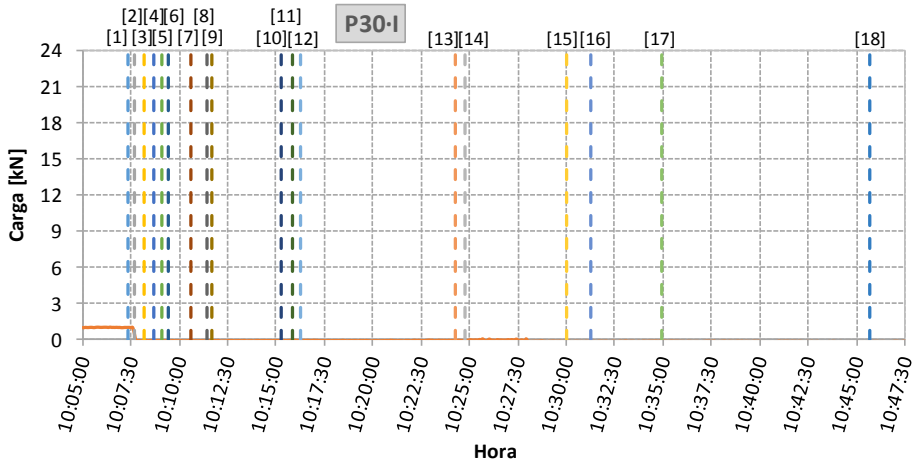
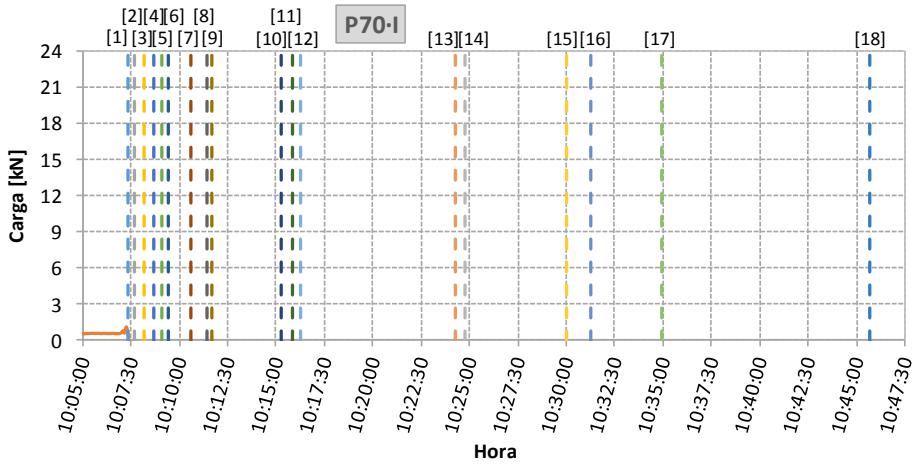


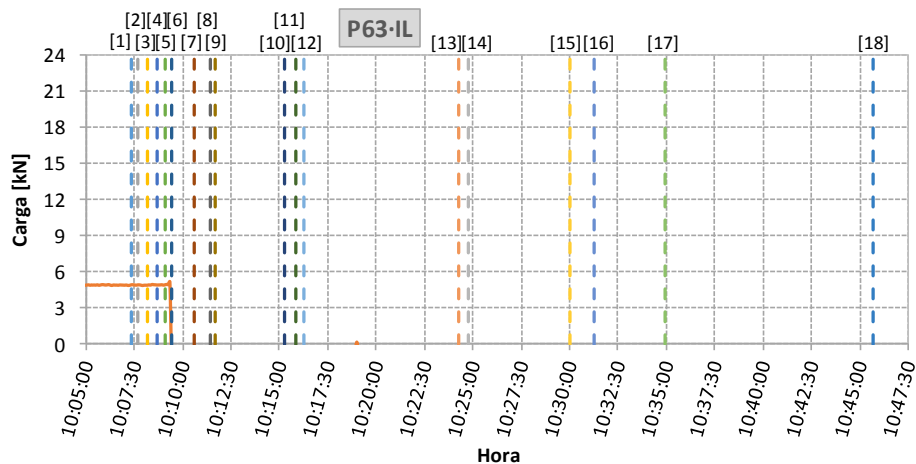
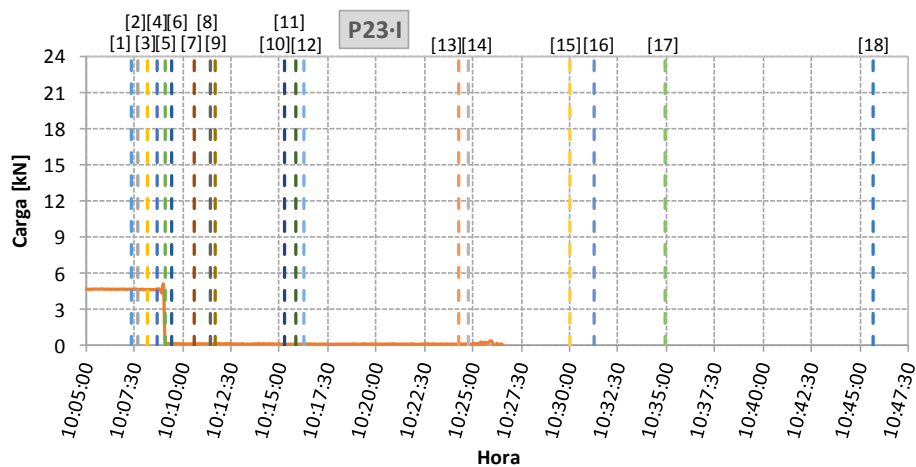
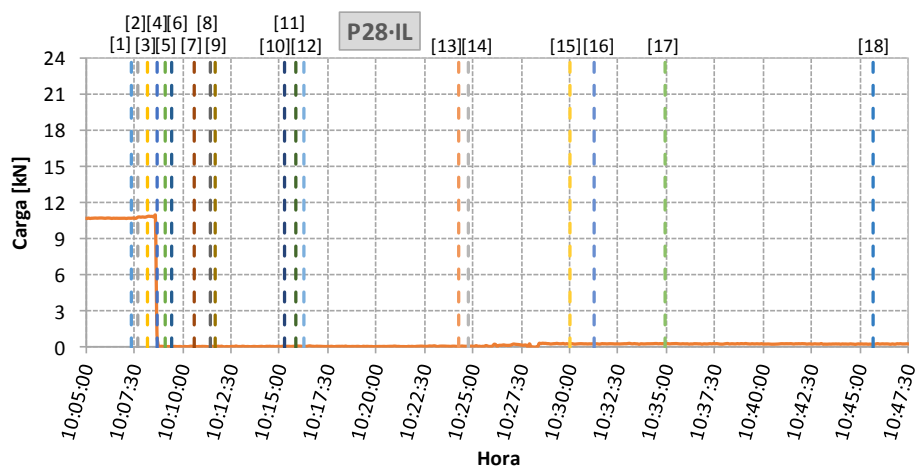


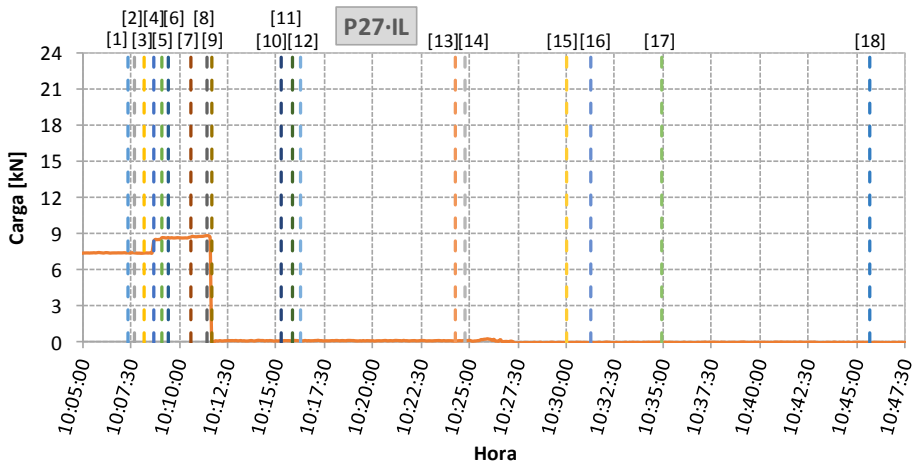
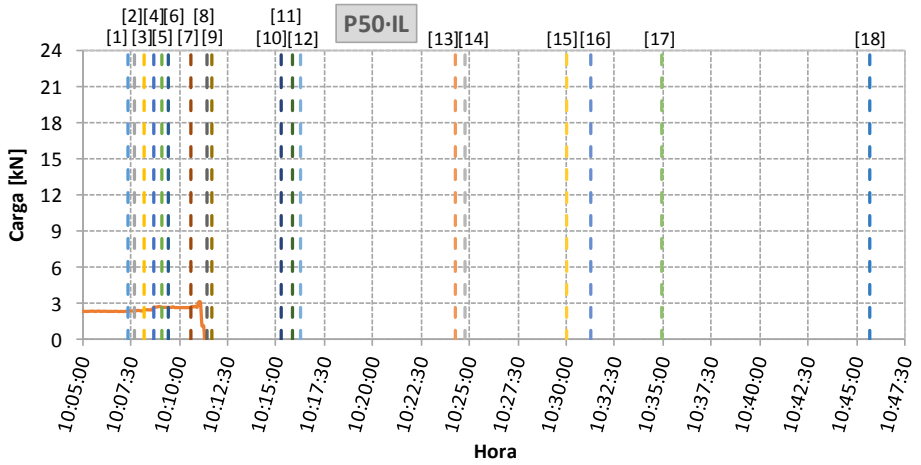
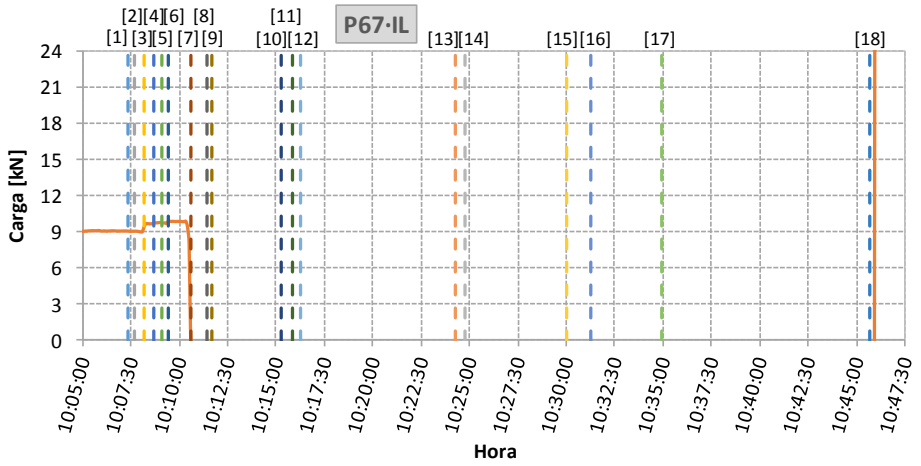


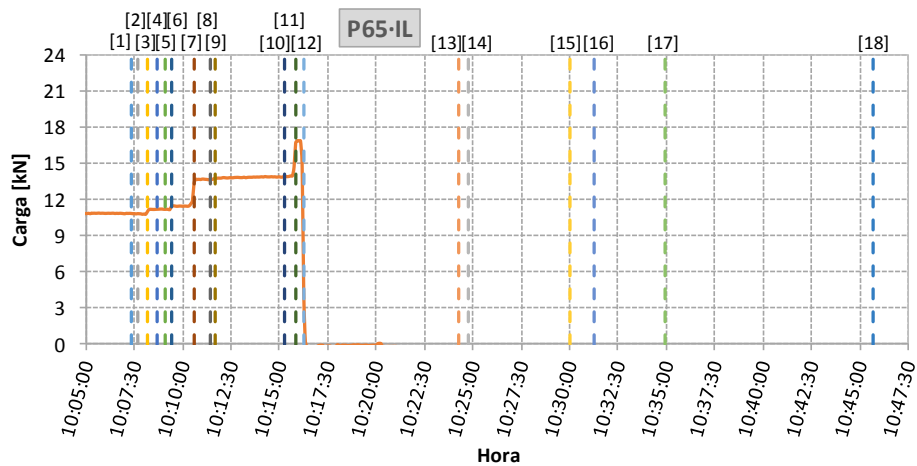
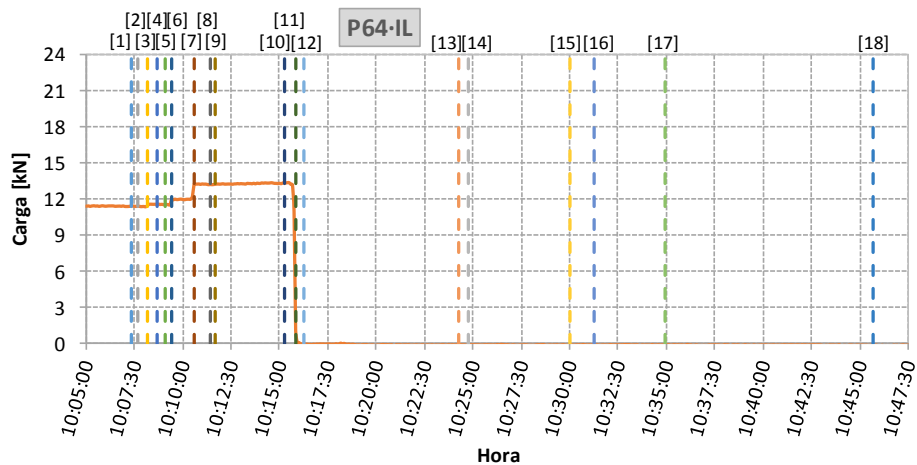
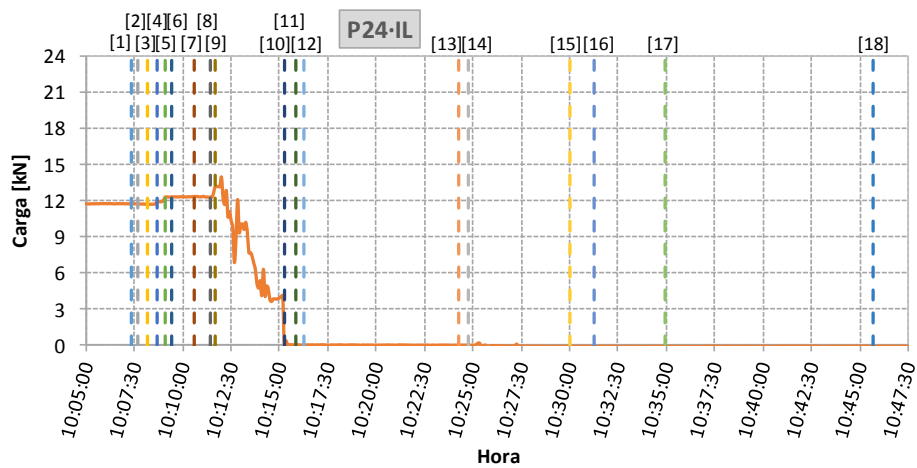


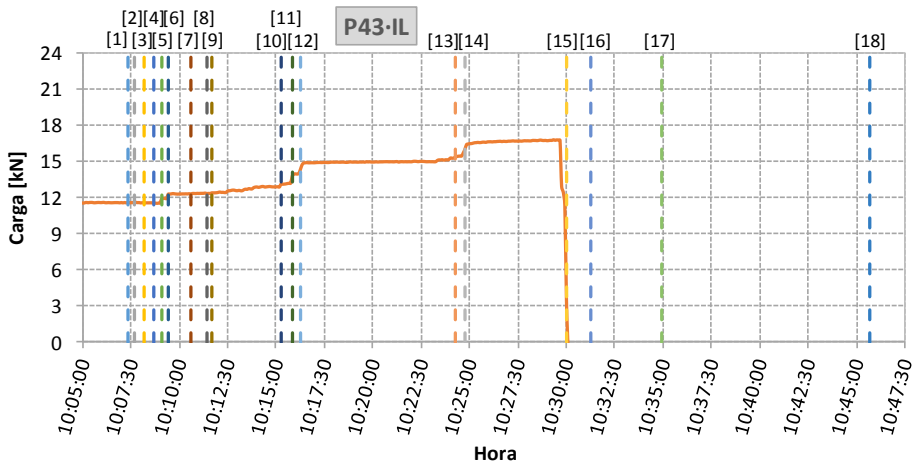
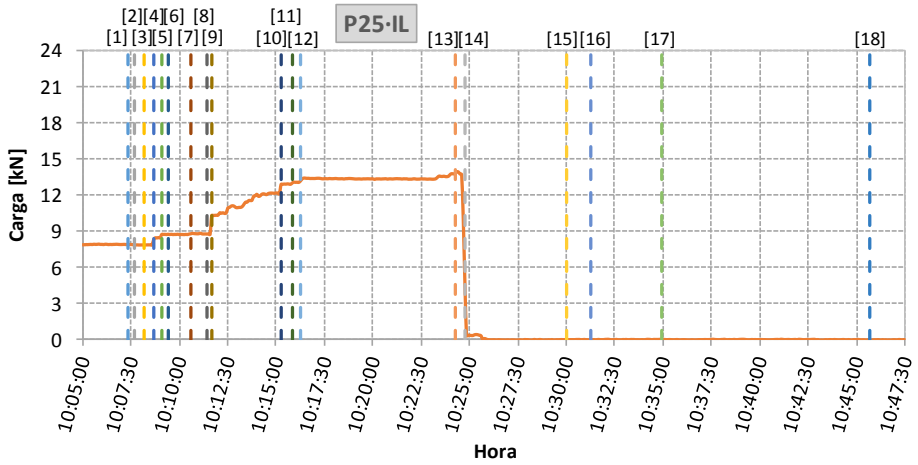
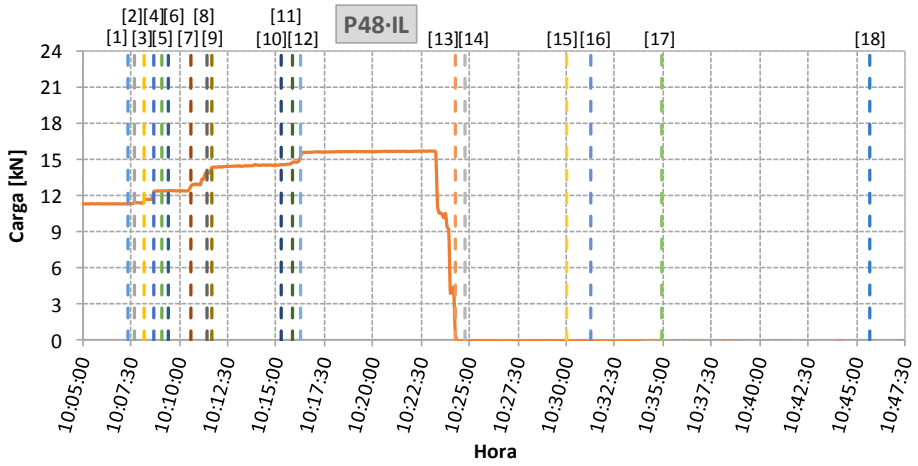


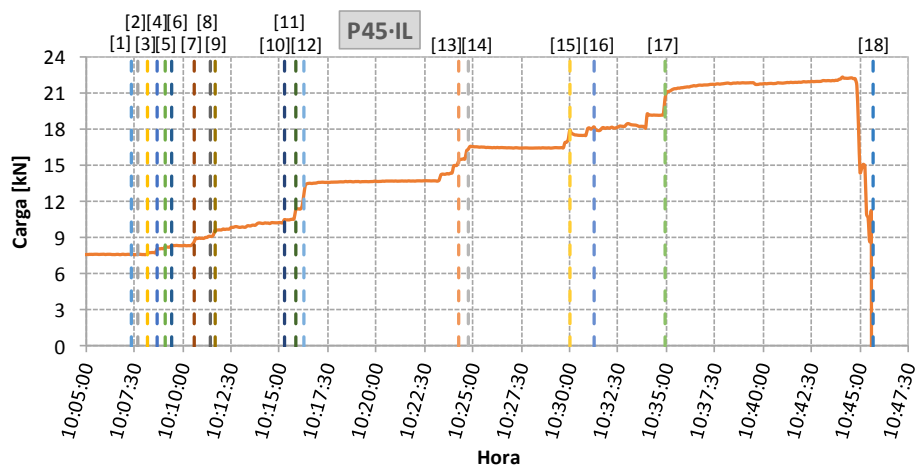
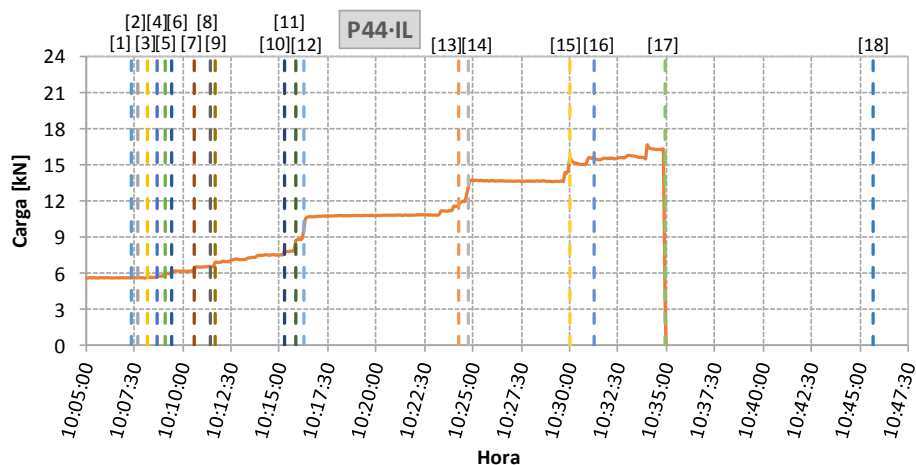
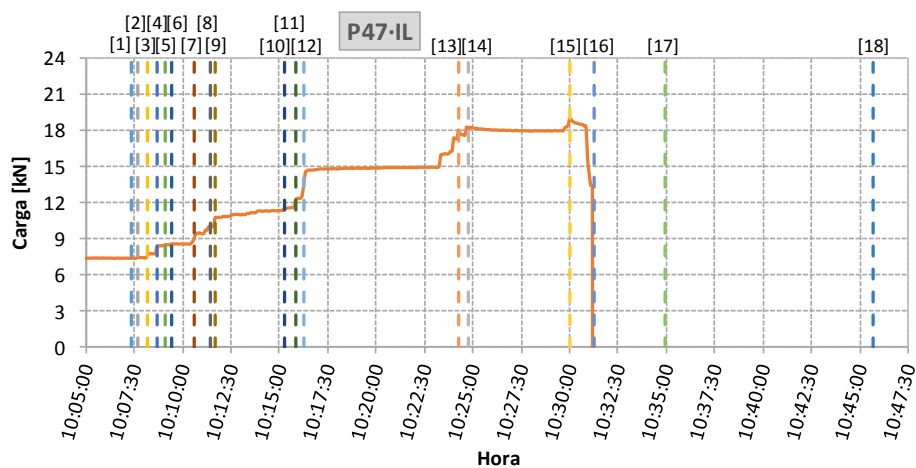












APÉNDICE 2. SIMULACIÓN NUMÉRICA

A2.1. Introducción

En este Apéndice se presentan todos los resultados obtenidos de la simulación numérica con la siguiente secuencia:

- Validación del modelo numérico.
- Resultados del estudio del efecto positivo del limitador de carga en el ensayo experimental.
- Resultados del efecto positivo del limitador de carga durante el descimbrado.

En los diferentes apartados de este apéndice se realizan referencias a diferentes puntales y posiciones de las pértigas. Las posiciones de ambos se muestran en la Fig. A2.1.

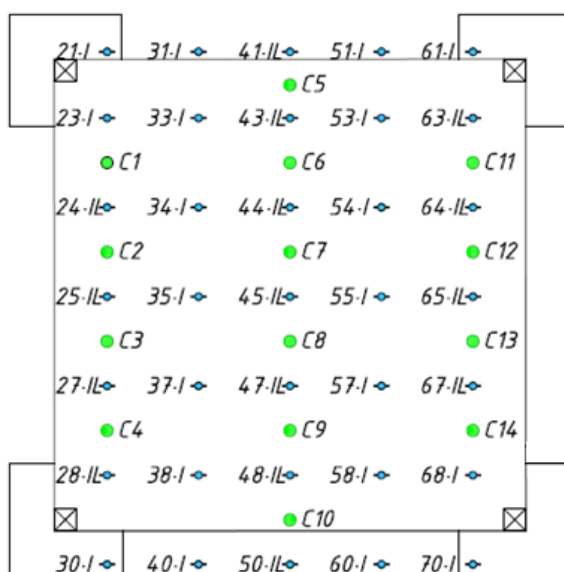
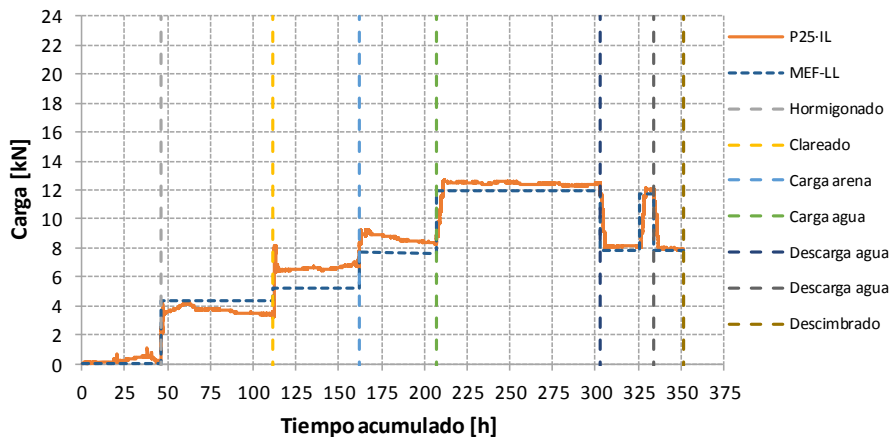
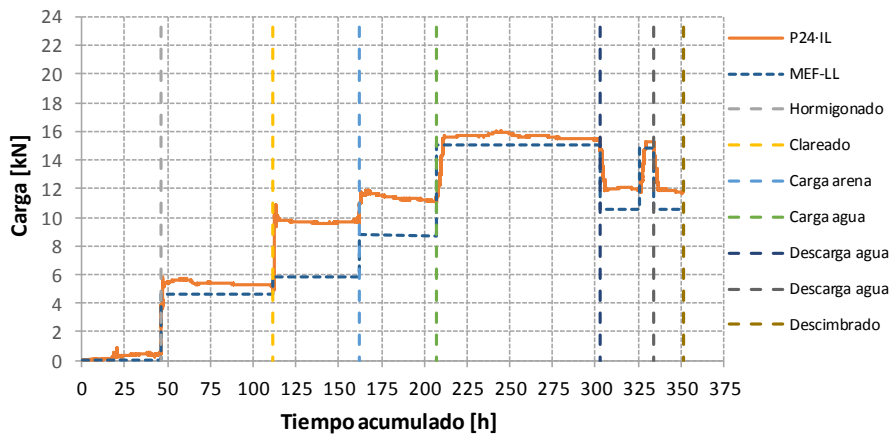
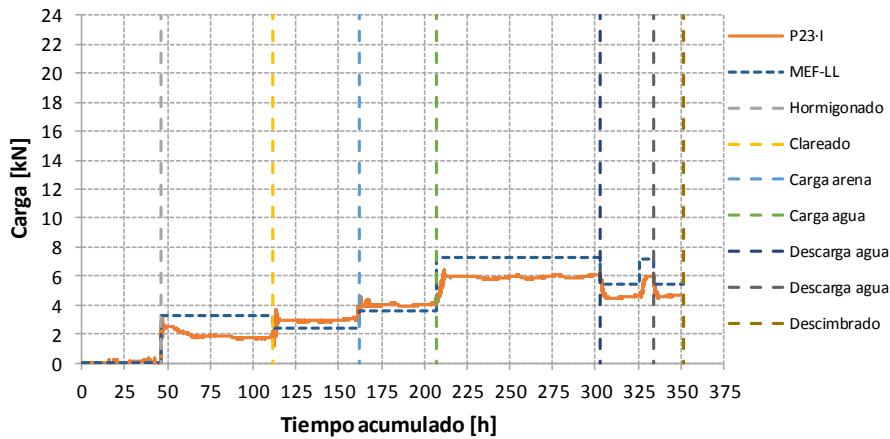


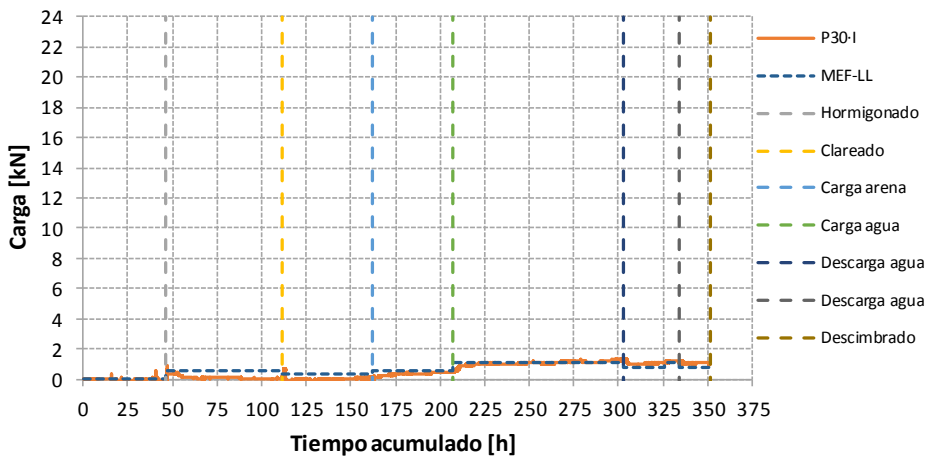
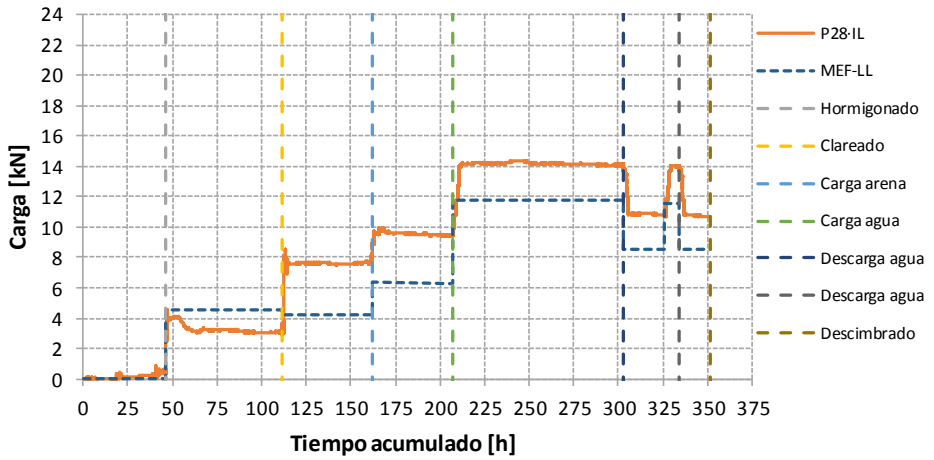
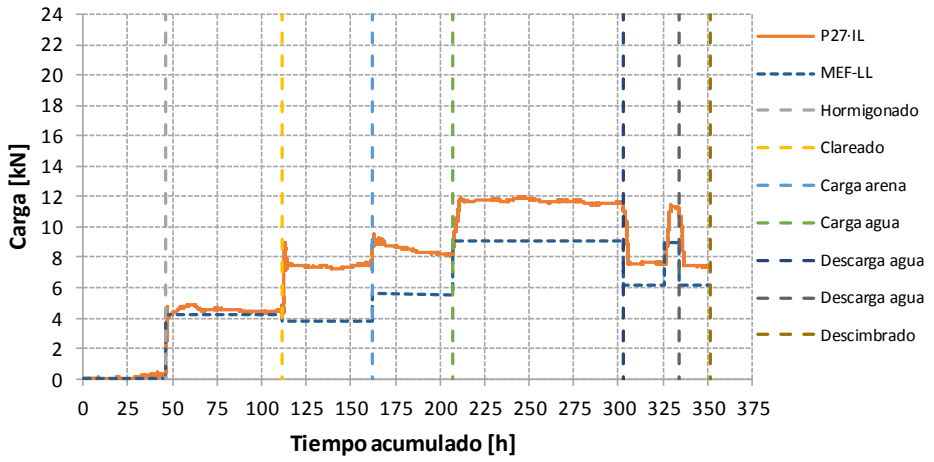
Fig. A2.1. Distribución de puntales y posición de pértigas.

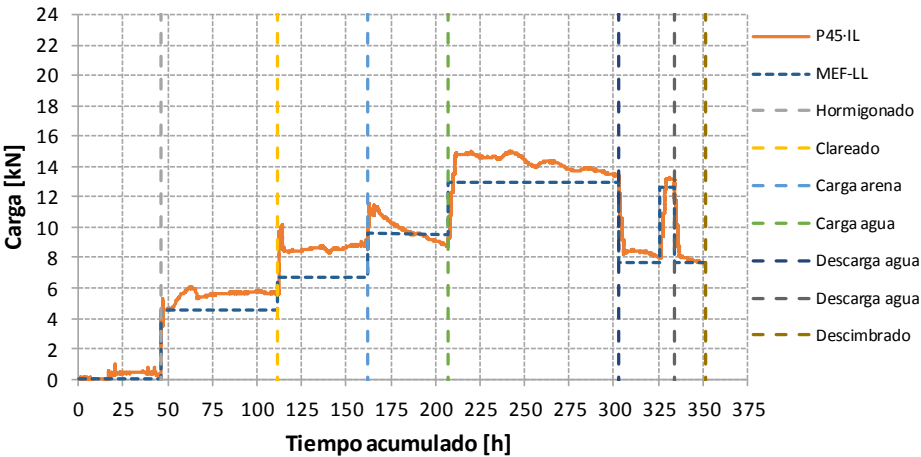
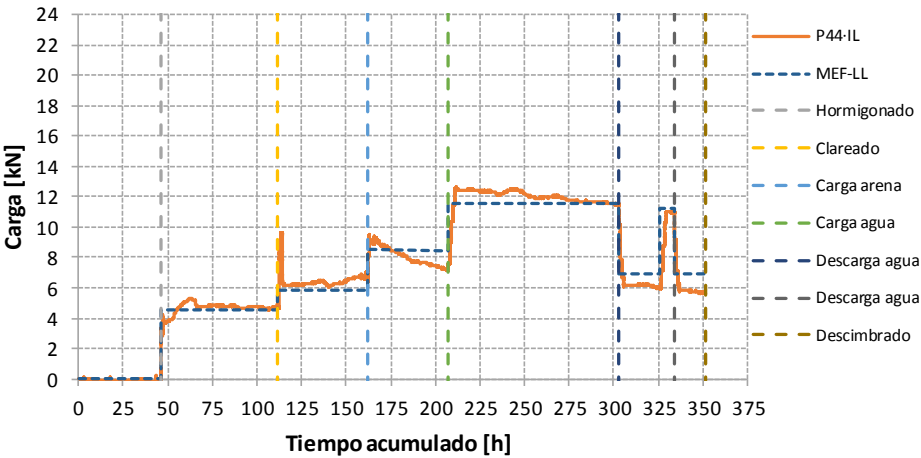
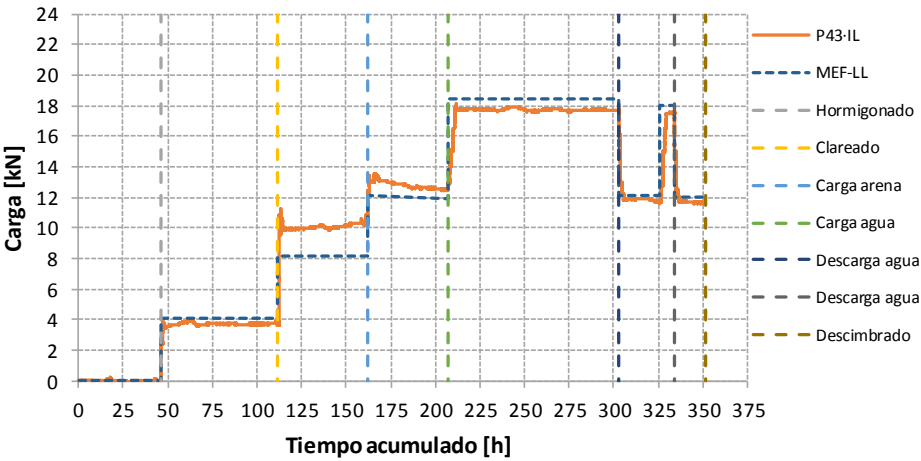
A2.2. Comprobación del modelo numérico

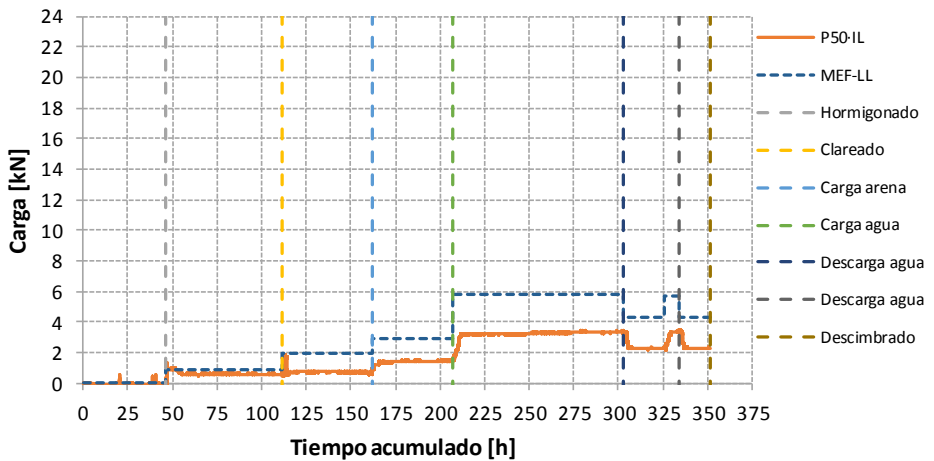
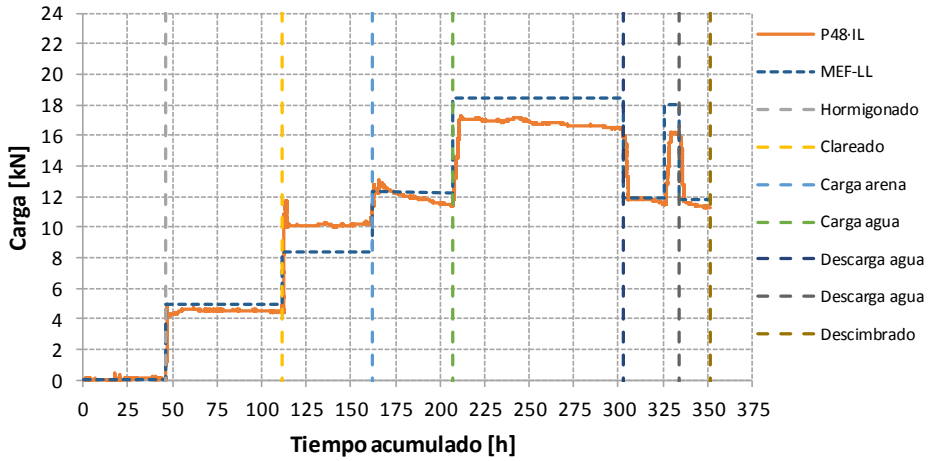
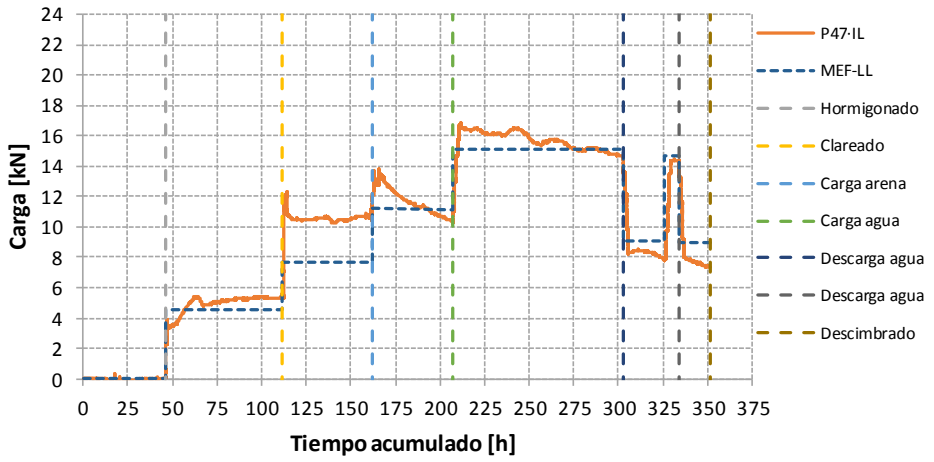
La comprobación del modelo numérico, referente al ensayo experimental, se realizó comparando las cargas en puntales y los desplazamientos en los puntos donde se sitúan las pértigas en el ensayo entre las medidas experimentales y los resultados del modelo numérico. A continuación se presentan los resultados obtenidos.

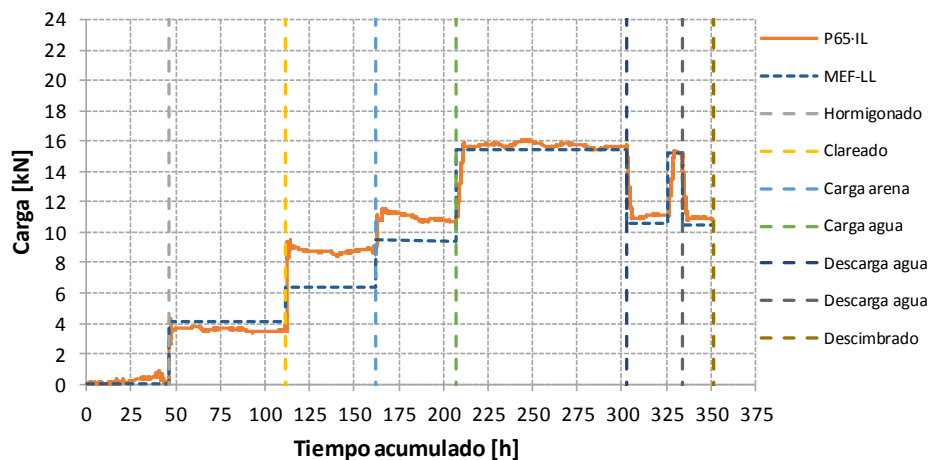
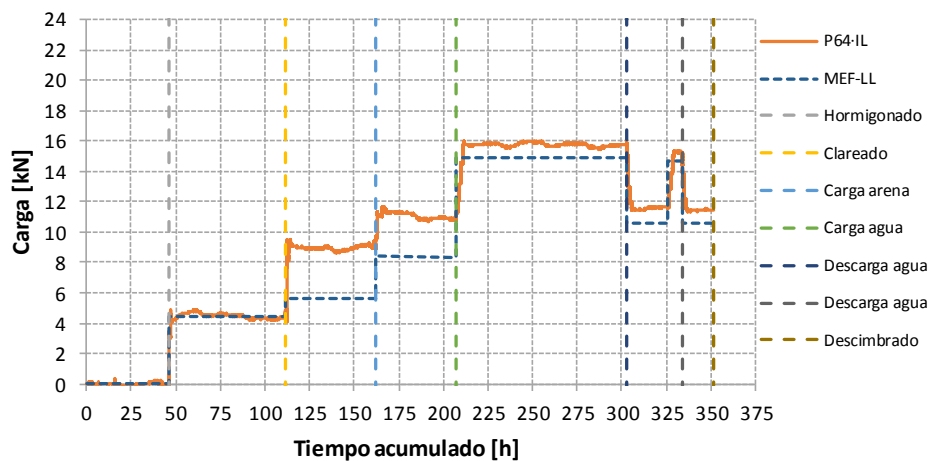
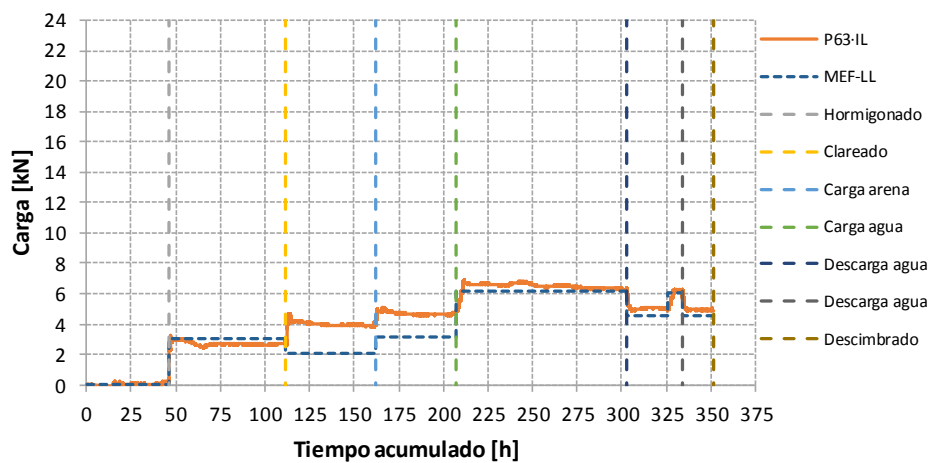
A2.2.1. Cargas en puntales

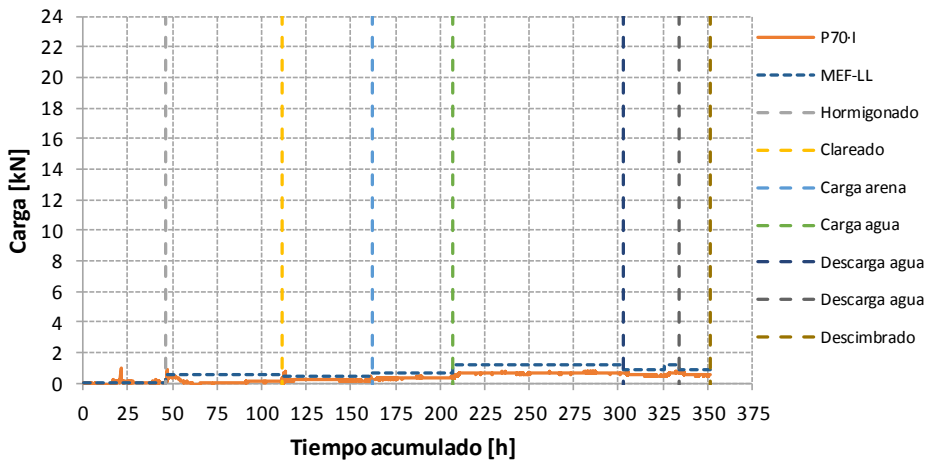
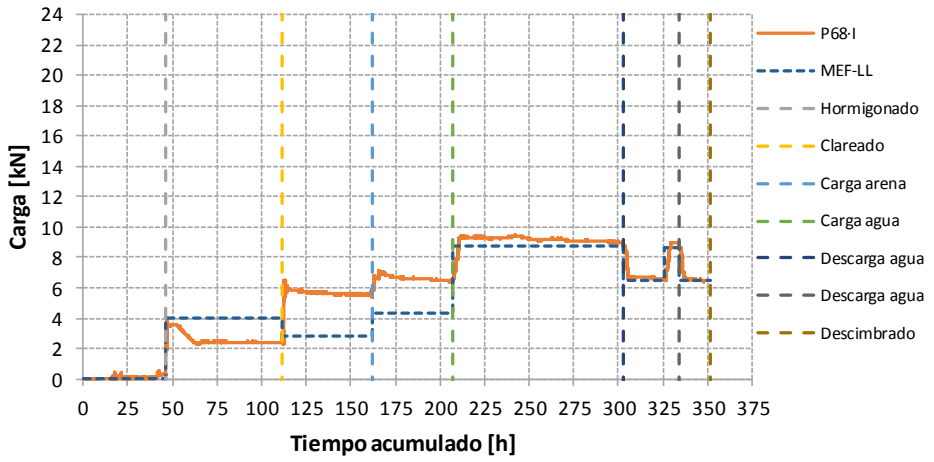
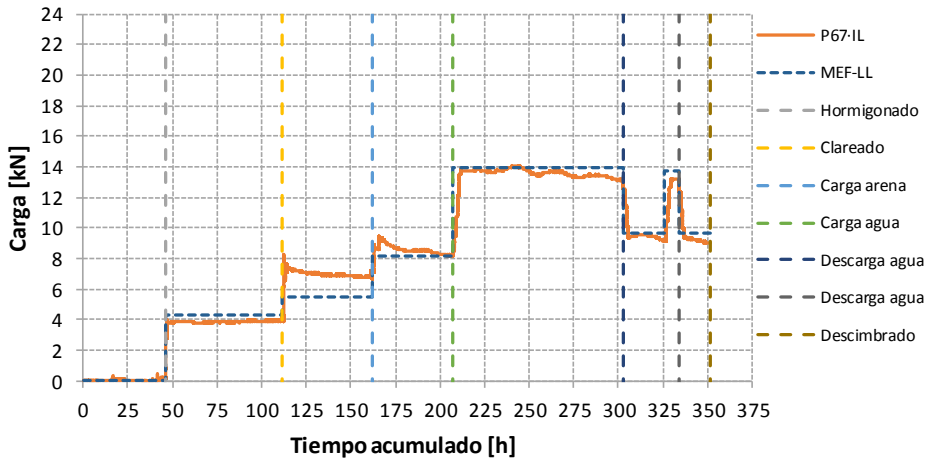




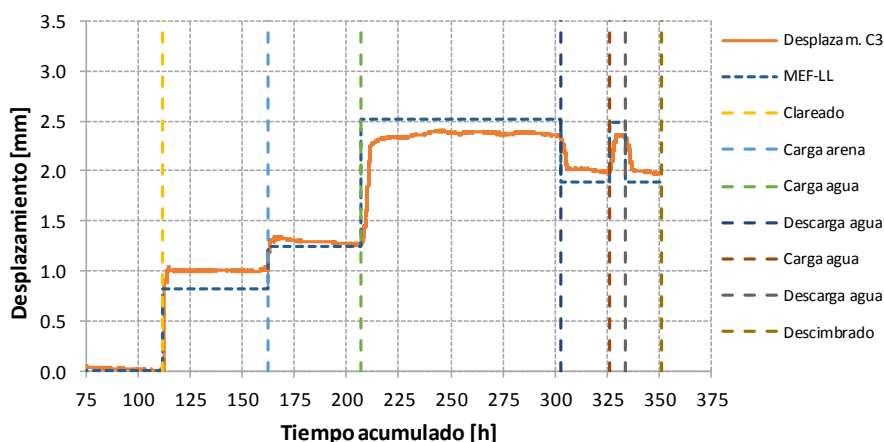
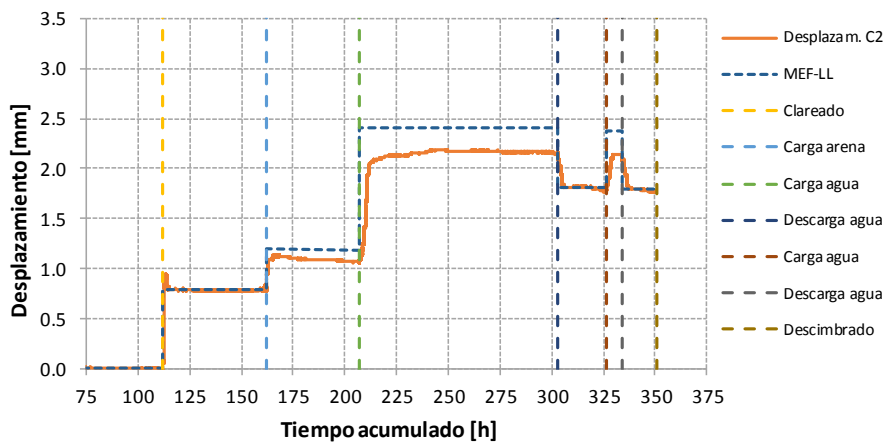
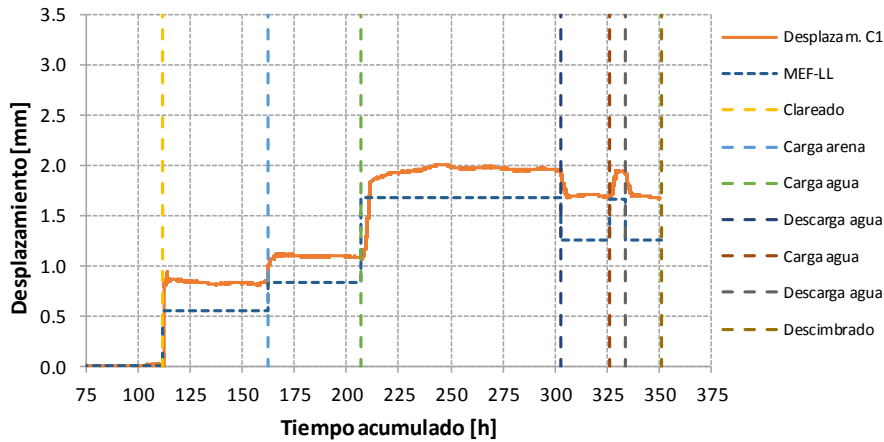


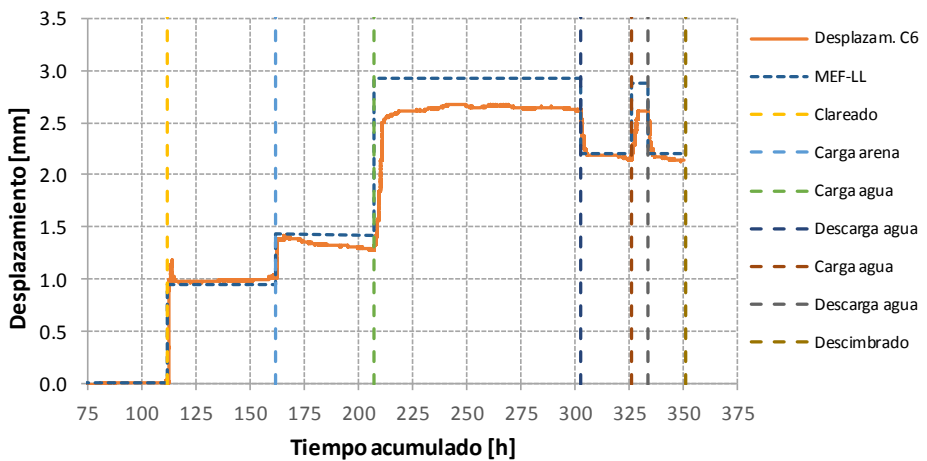
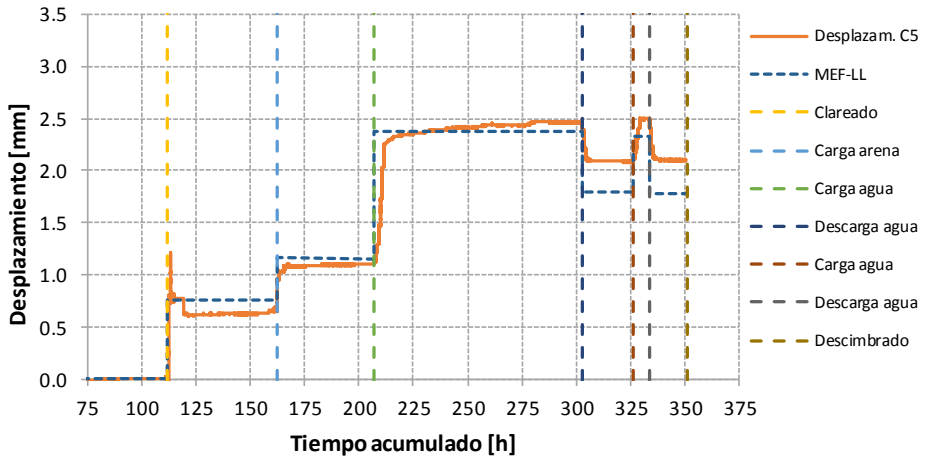
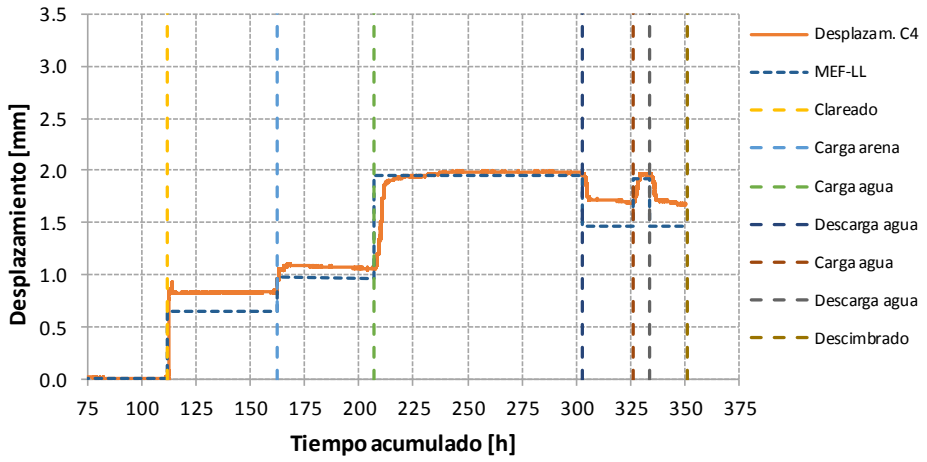


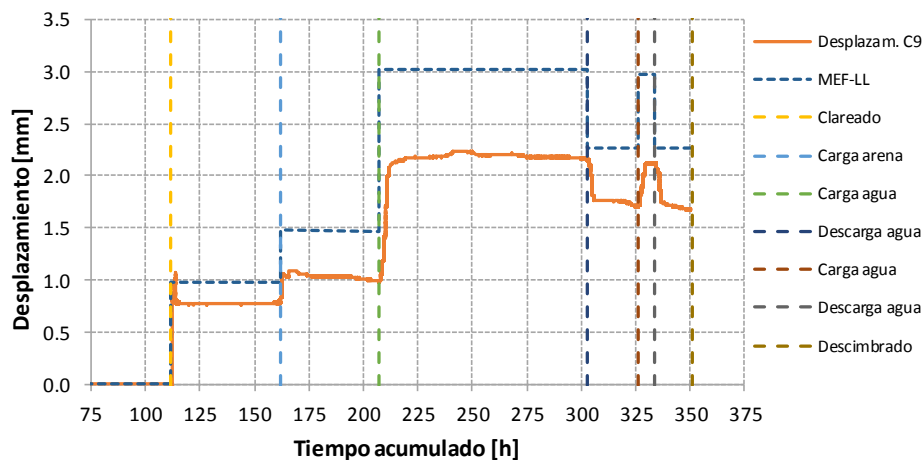
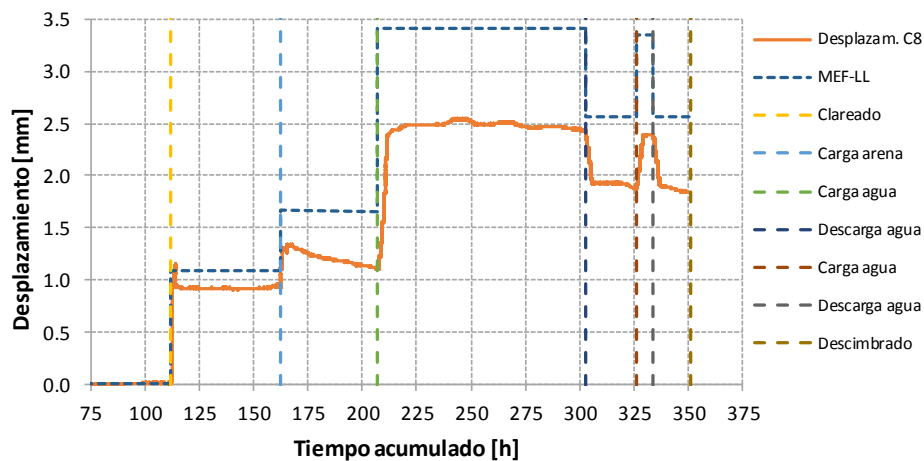
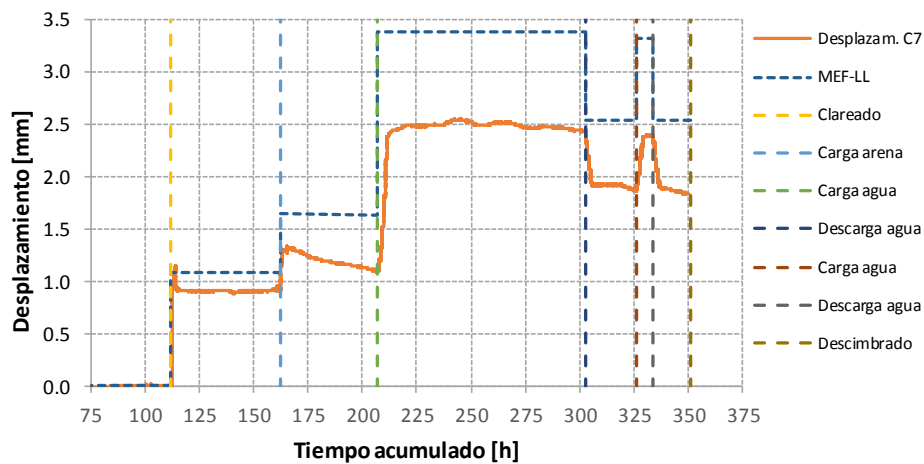


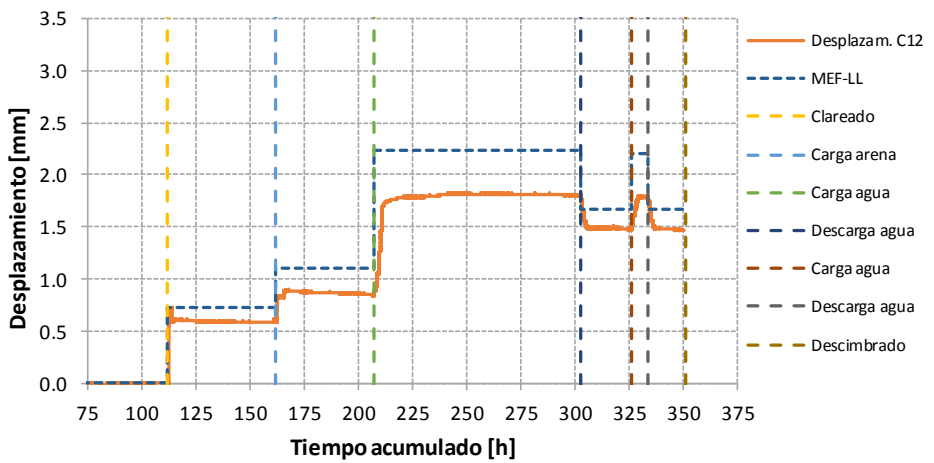
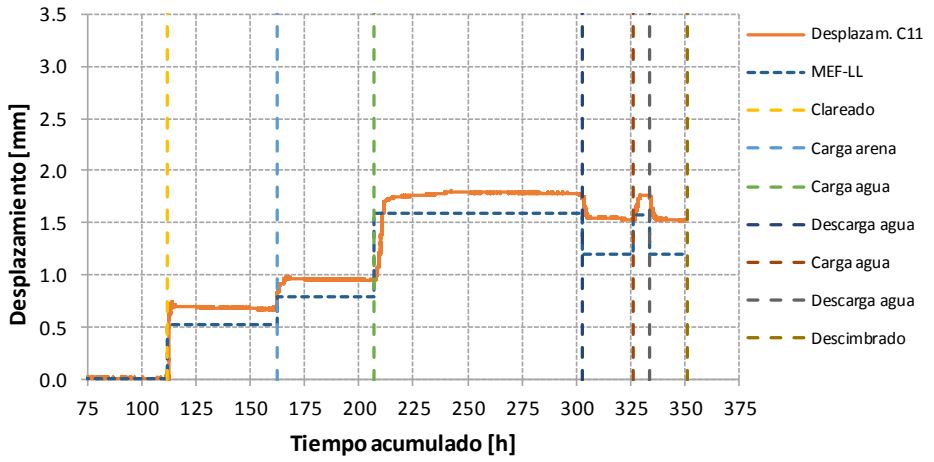
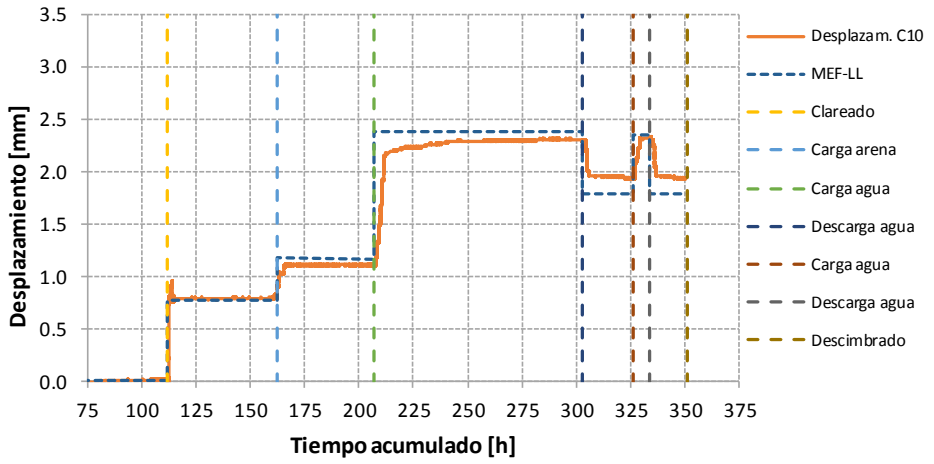


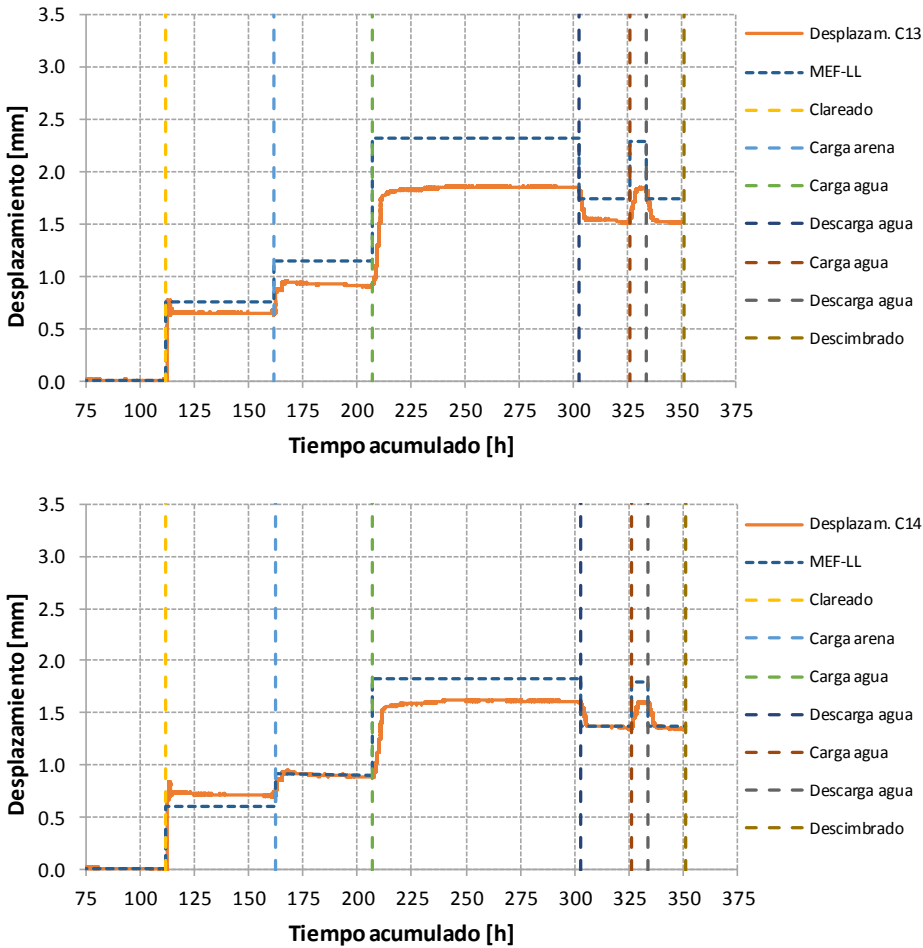
A2.2.2. Desplazamiento en pértigas







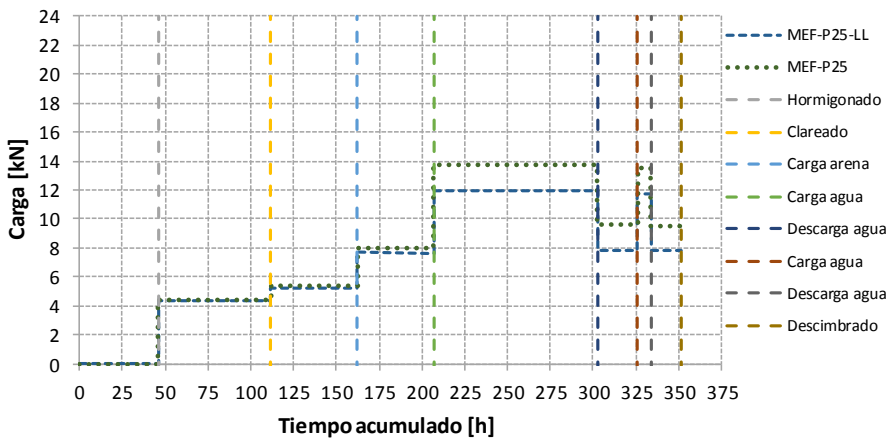
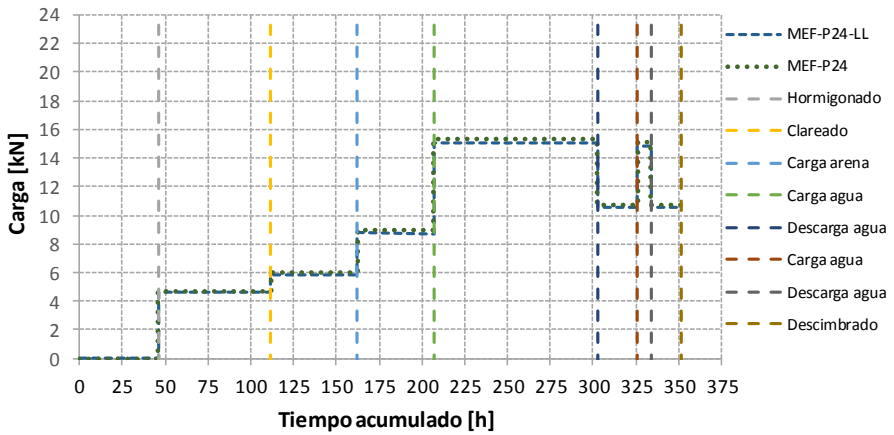
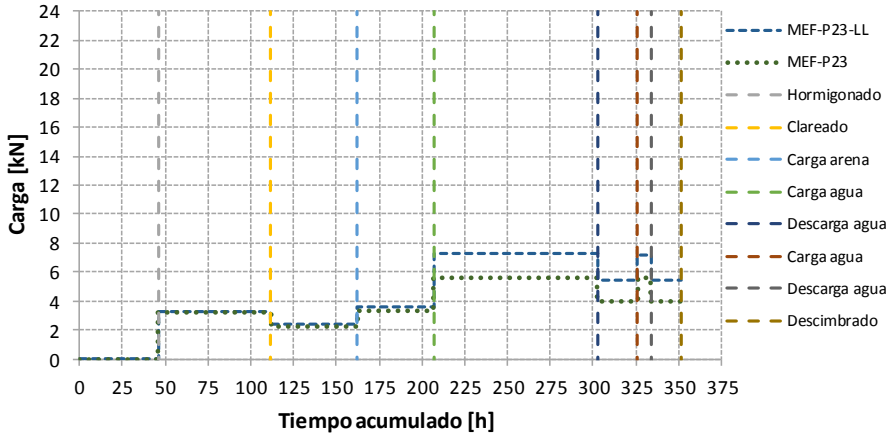


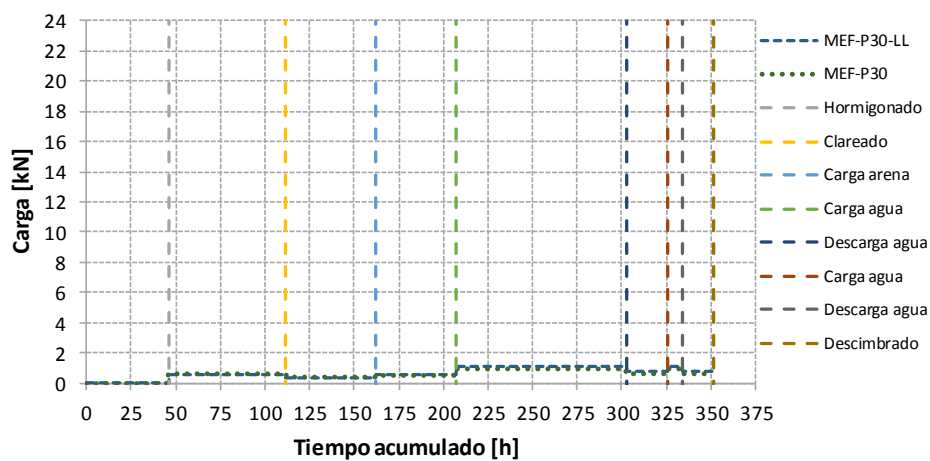
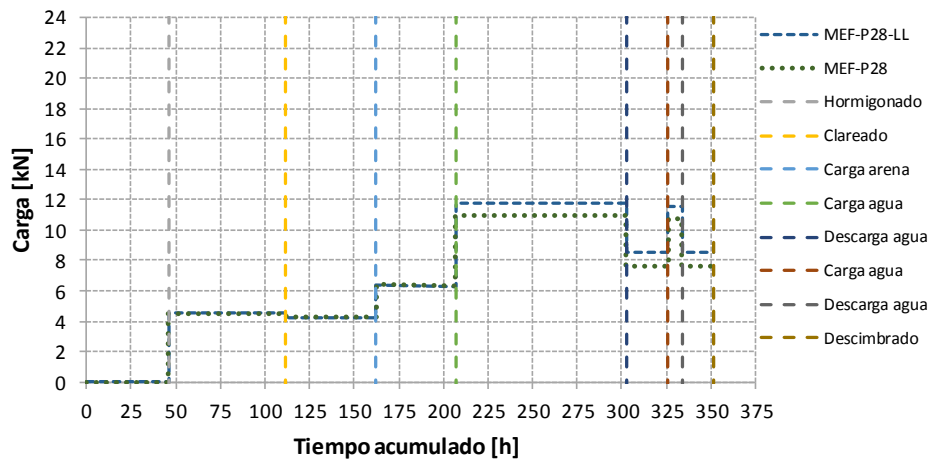
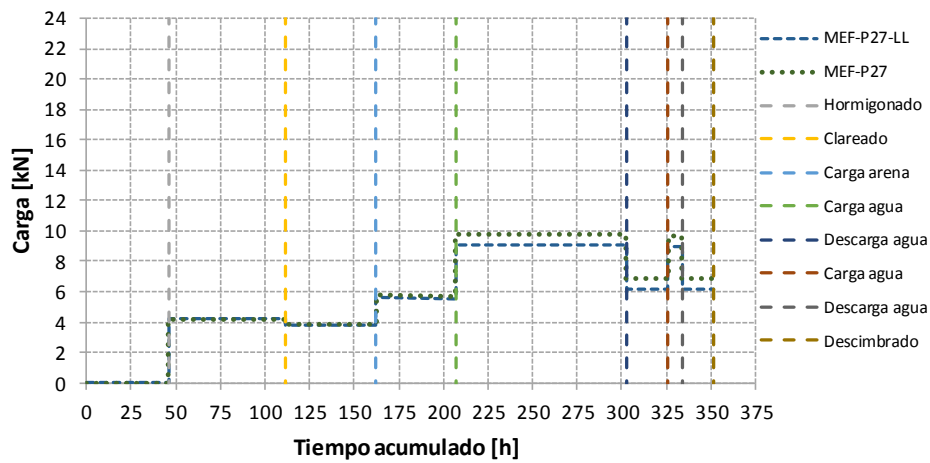


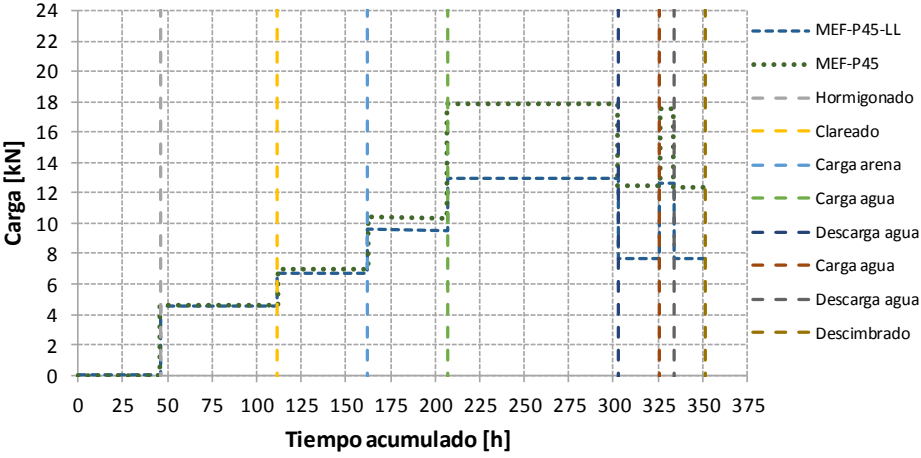
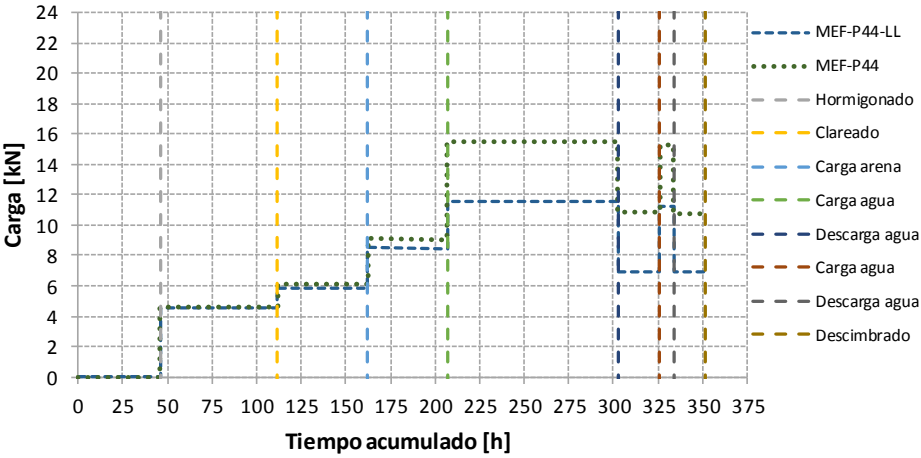
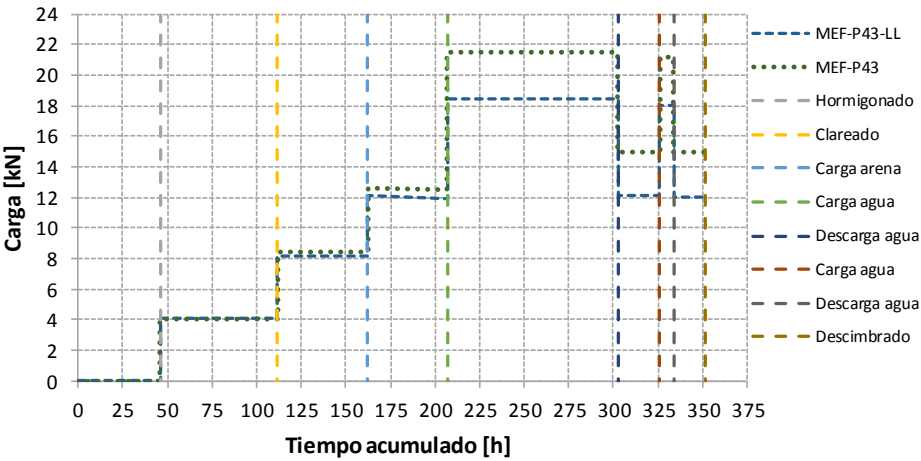
A2.3. Resultados del estudio del efecto positivo del limitador de carga en el ensayo

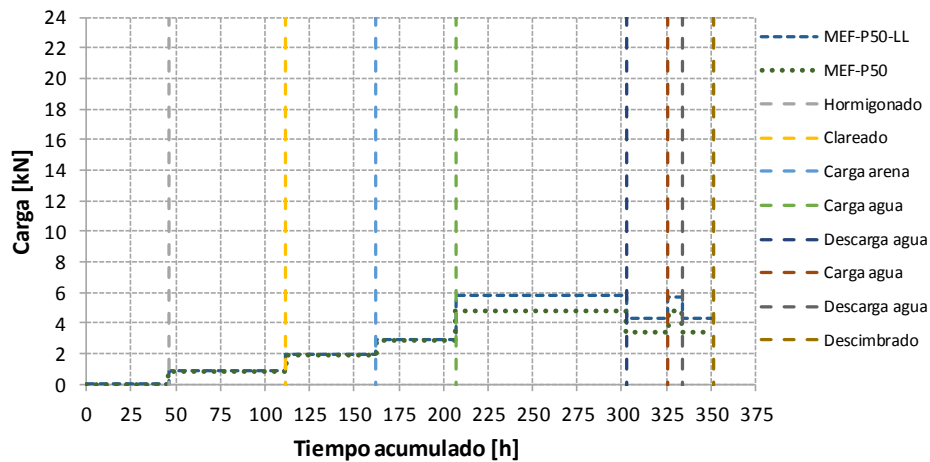
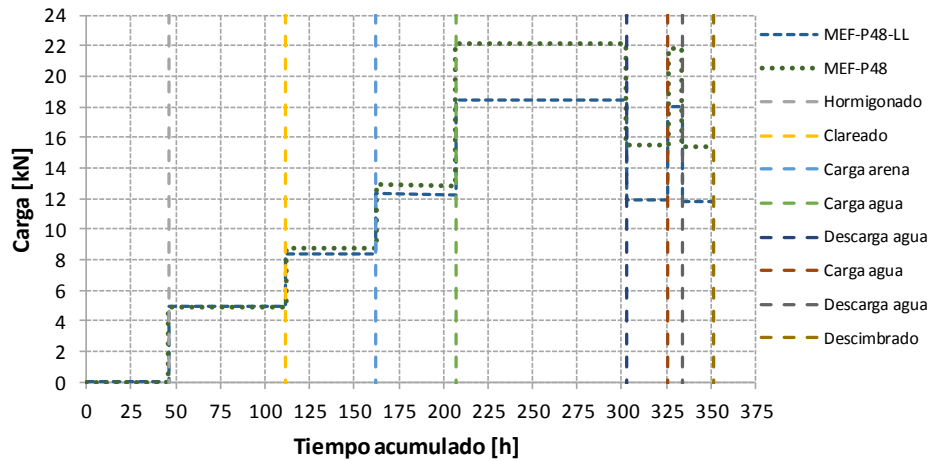
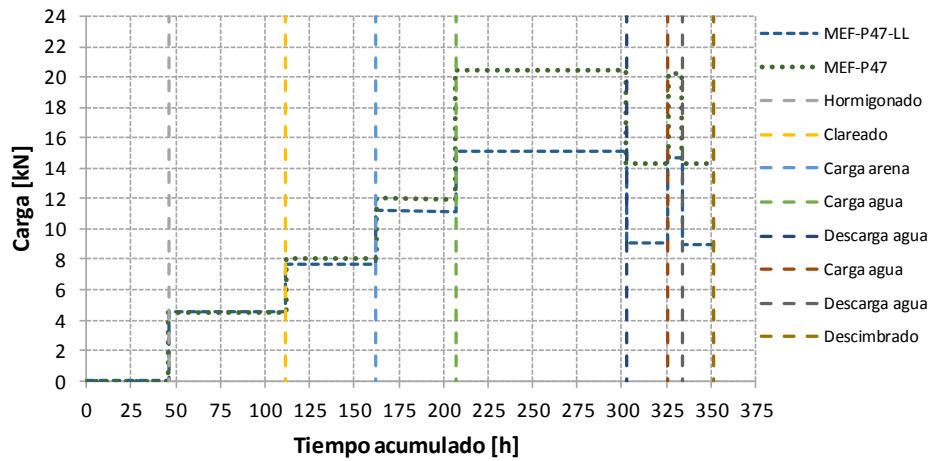
En este apartado se presentan los resultados obtenidos del modelo numérico, calibrado y validado, para el caso en el que se utilizaron limitadores de carga en los puntales en comparación con el hipotético caso de no haberse utilizado limitadores de carga. Las comparaciones se han realizado también para las cargas de cada uno de los puntales durante el ensayo experimental, y para el desplazamiento en los puntos donde se sitúan las pértigas. A continuación se presentan todos los resultados.

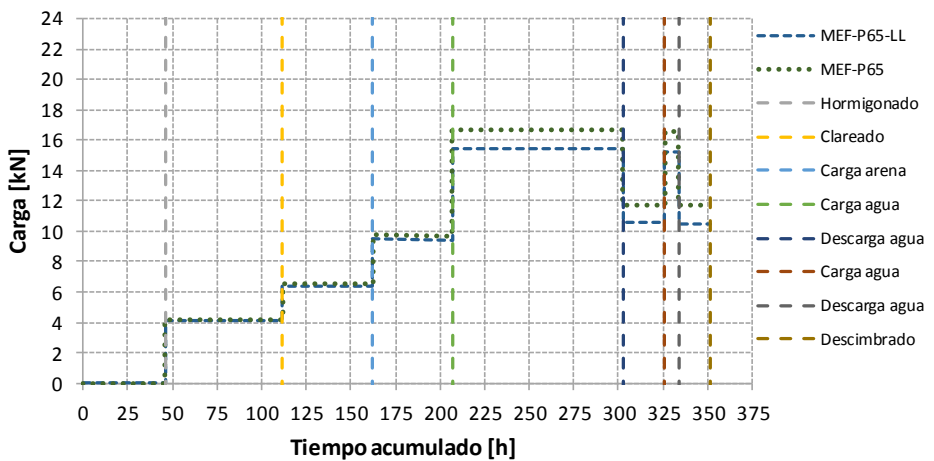
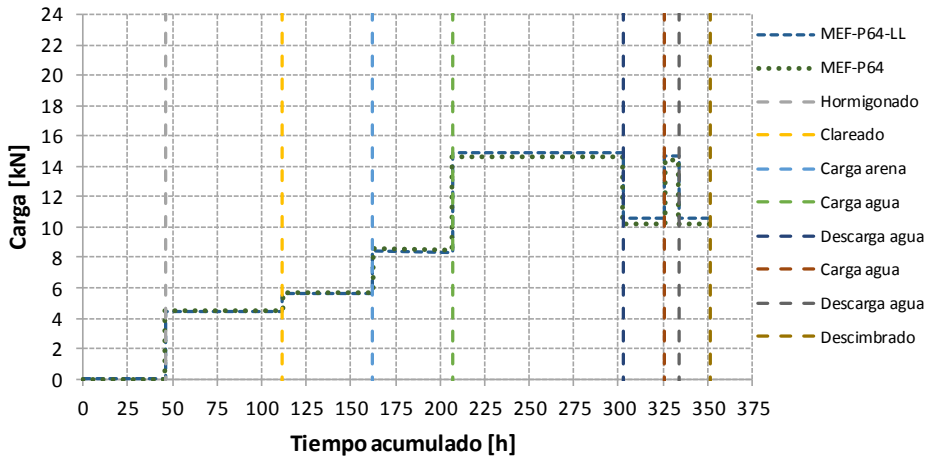
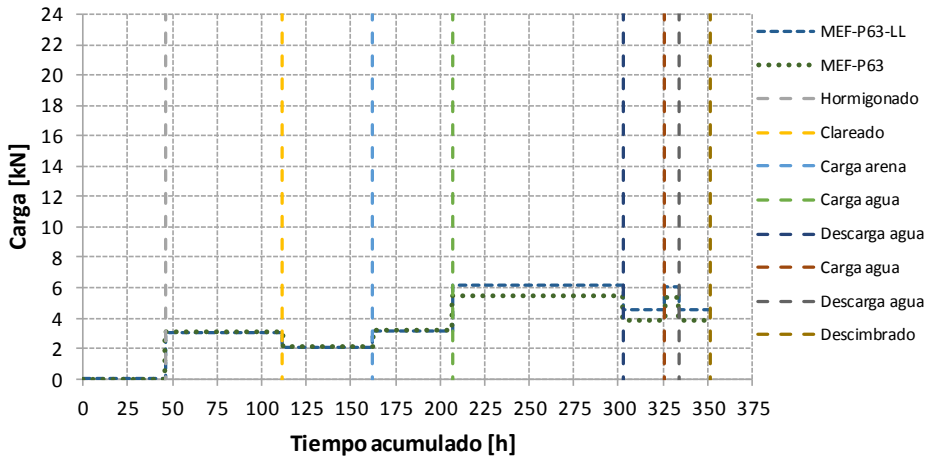
A2.3.1. Cargas en puntales

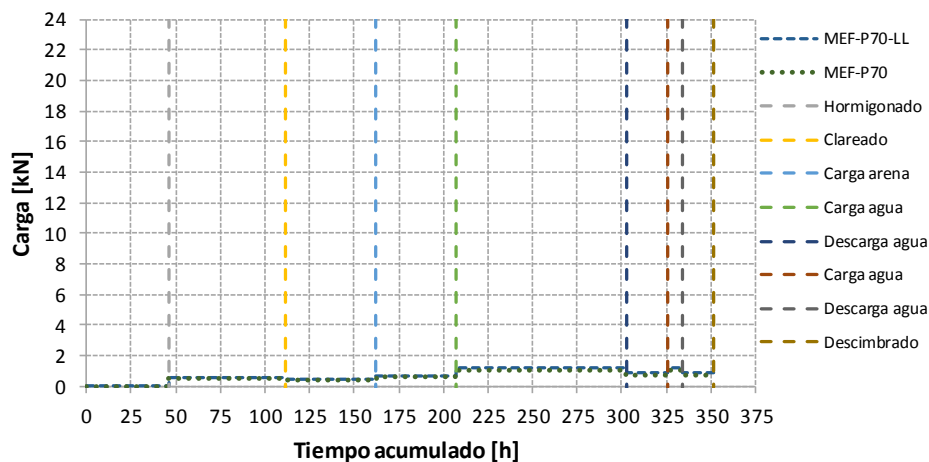
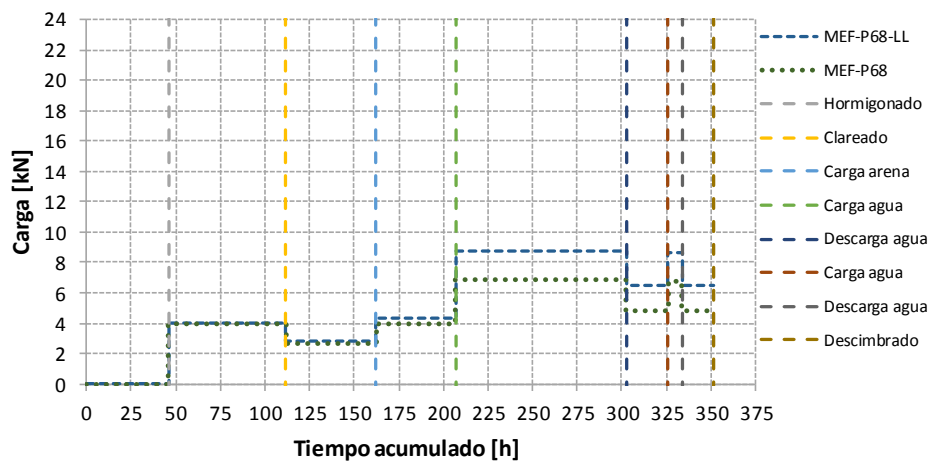
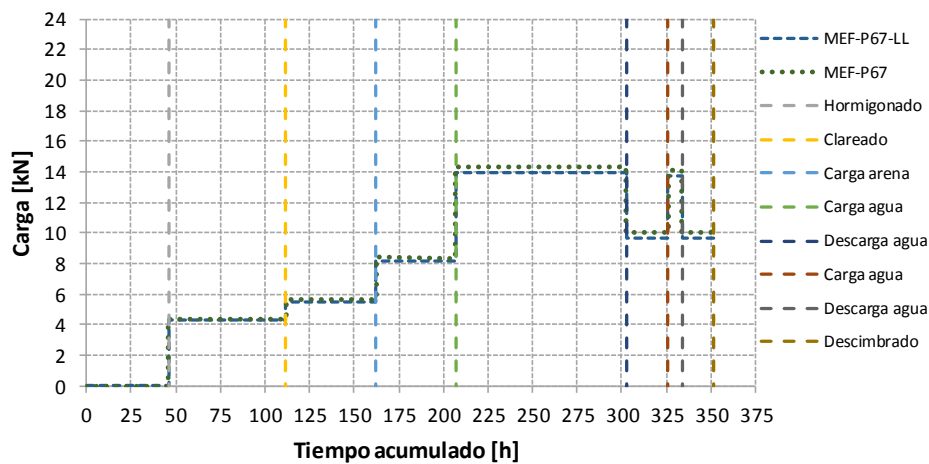




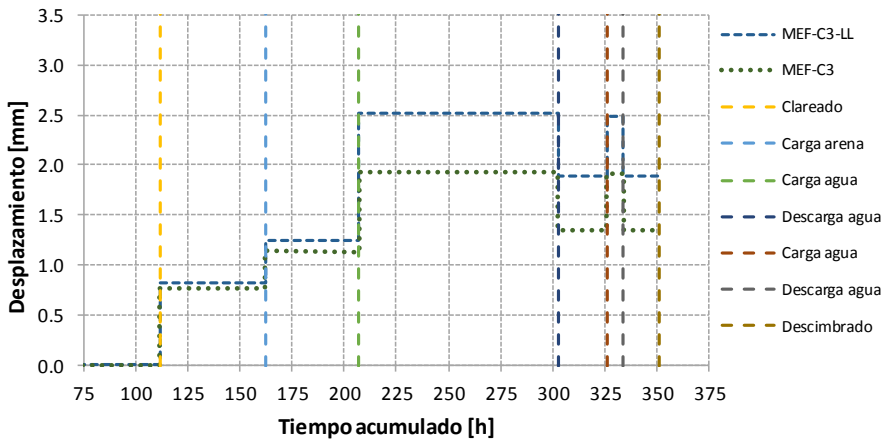
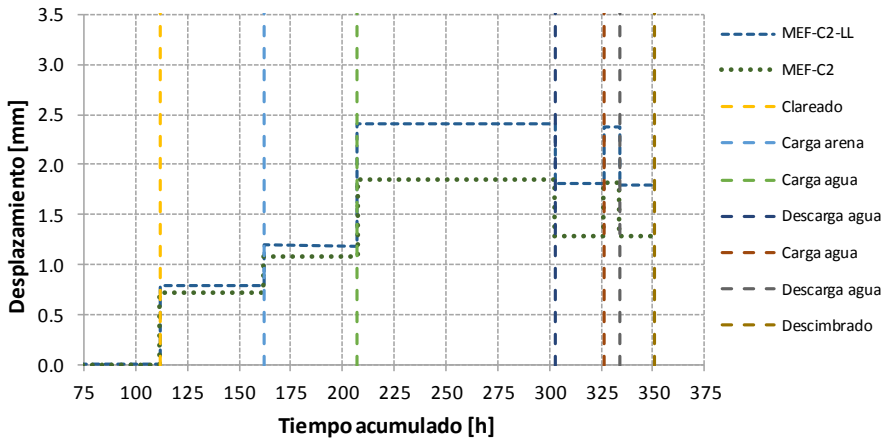
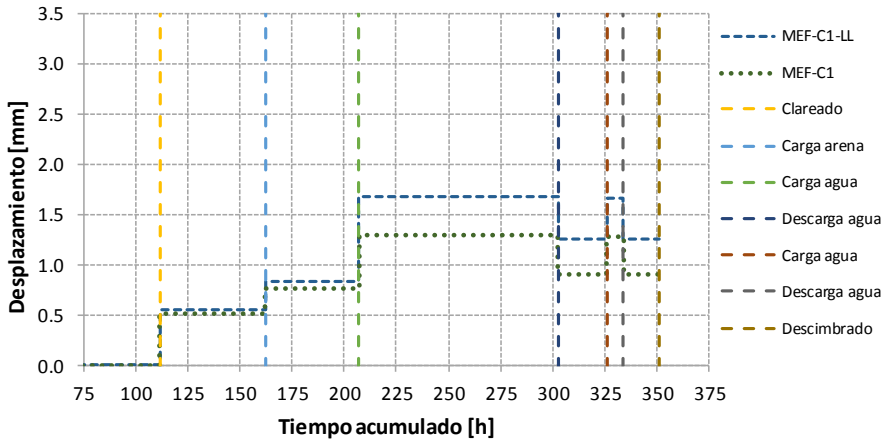


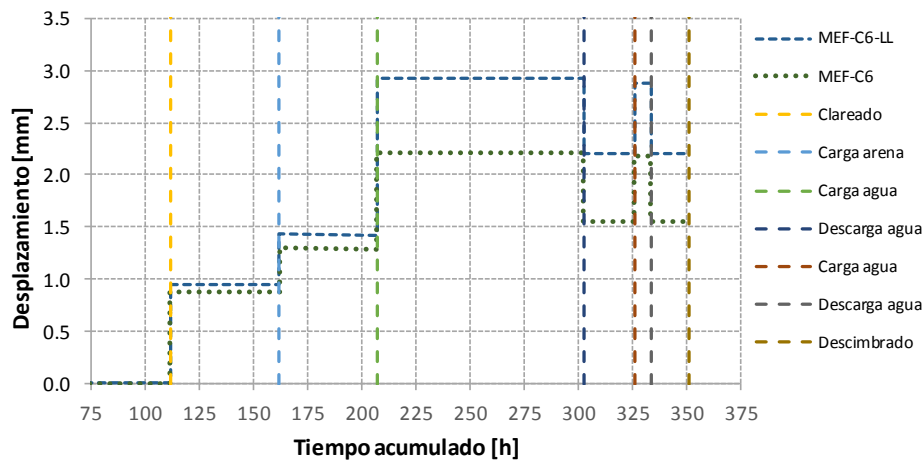
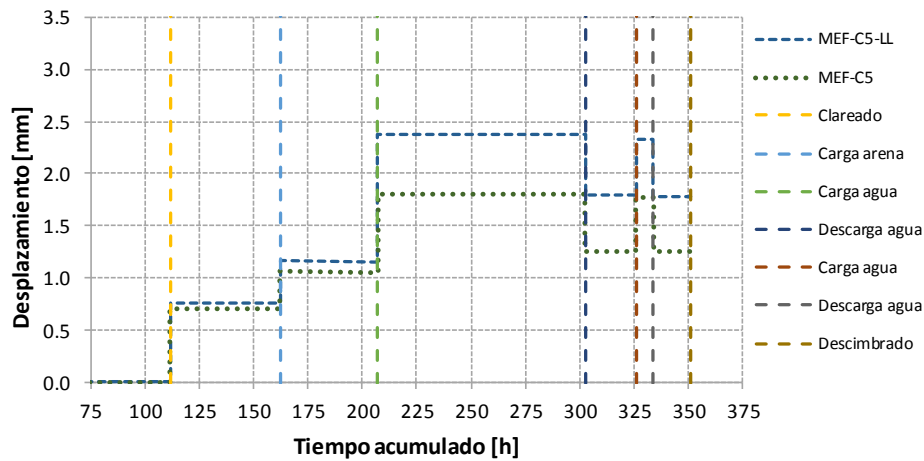
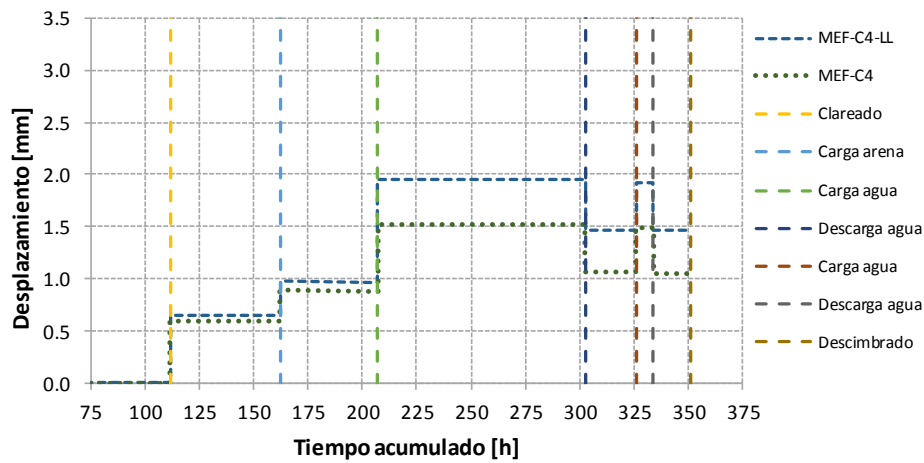


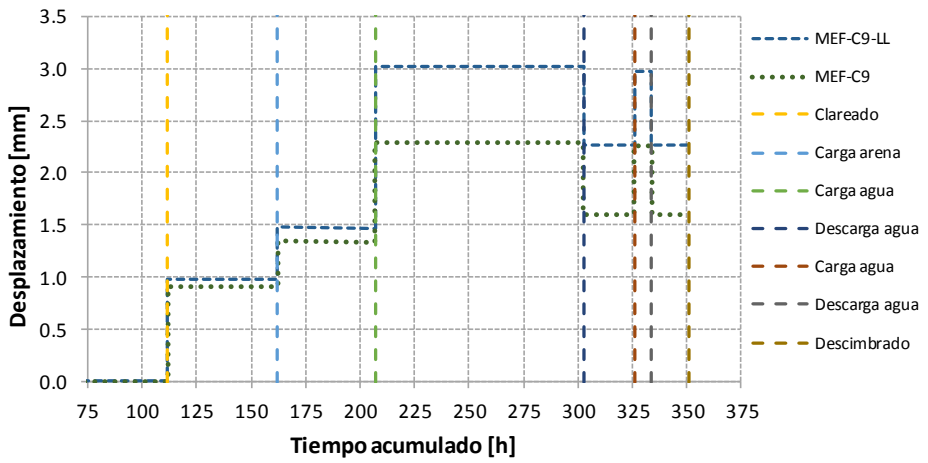
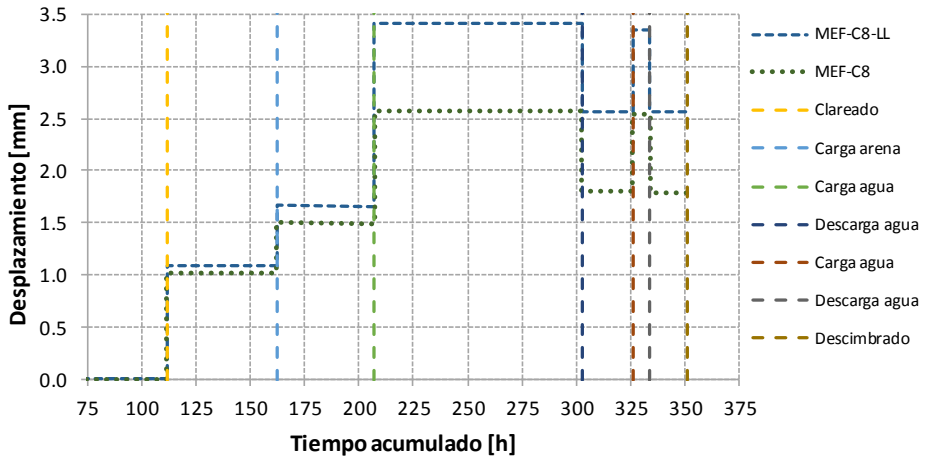
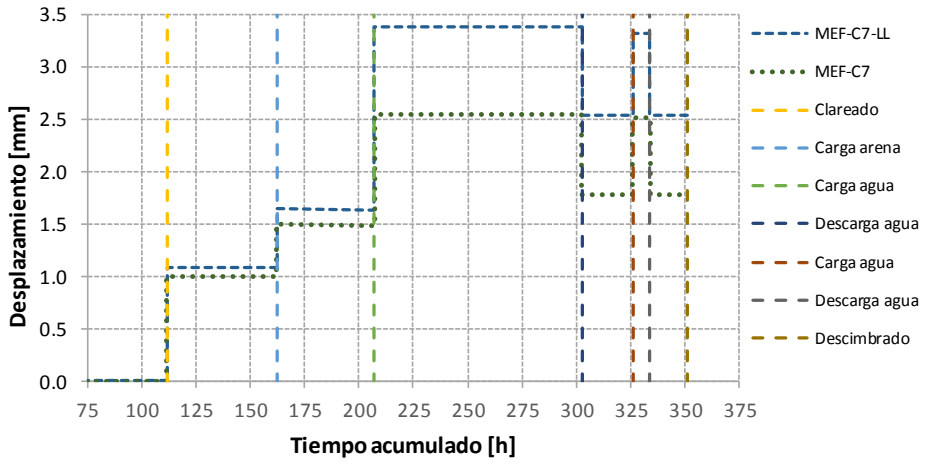


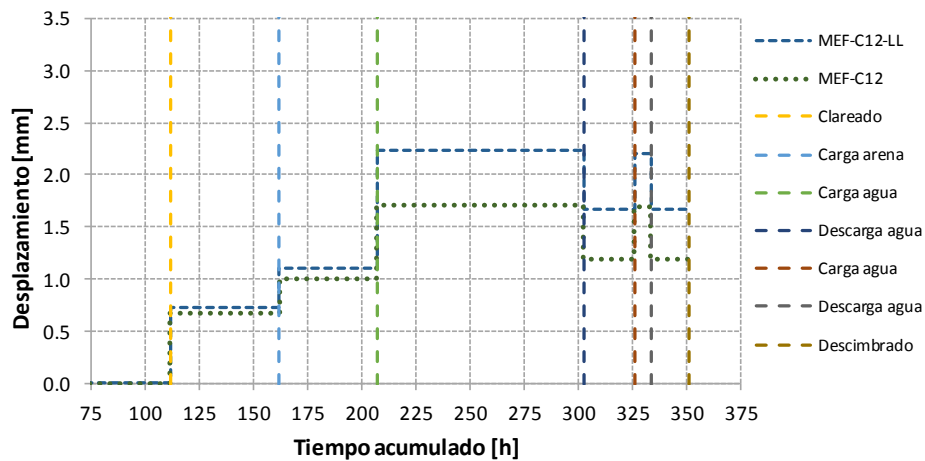
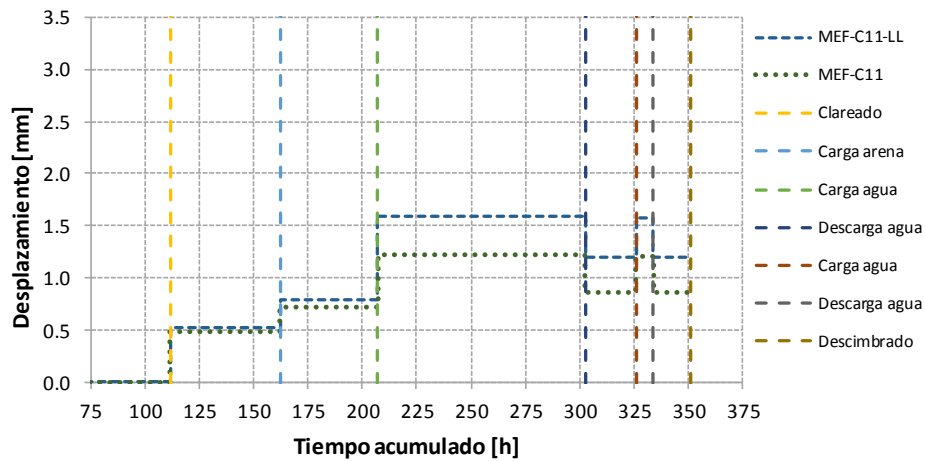
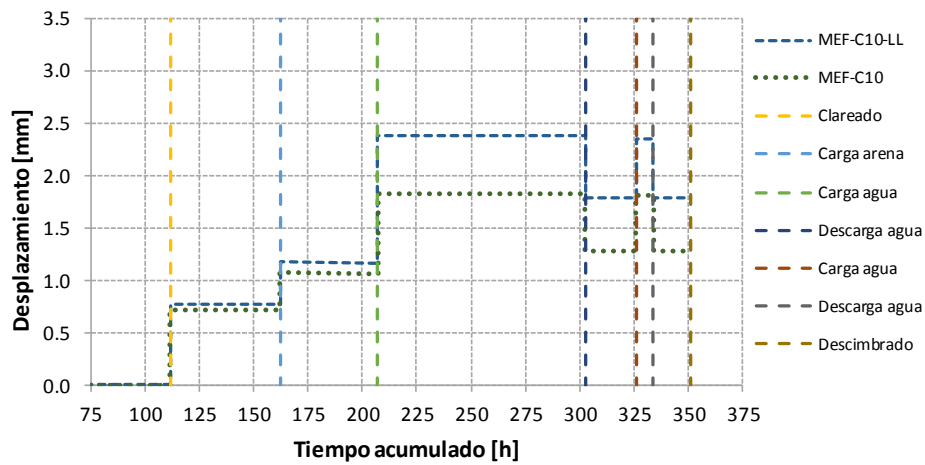


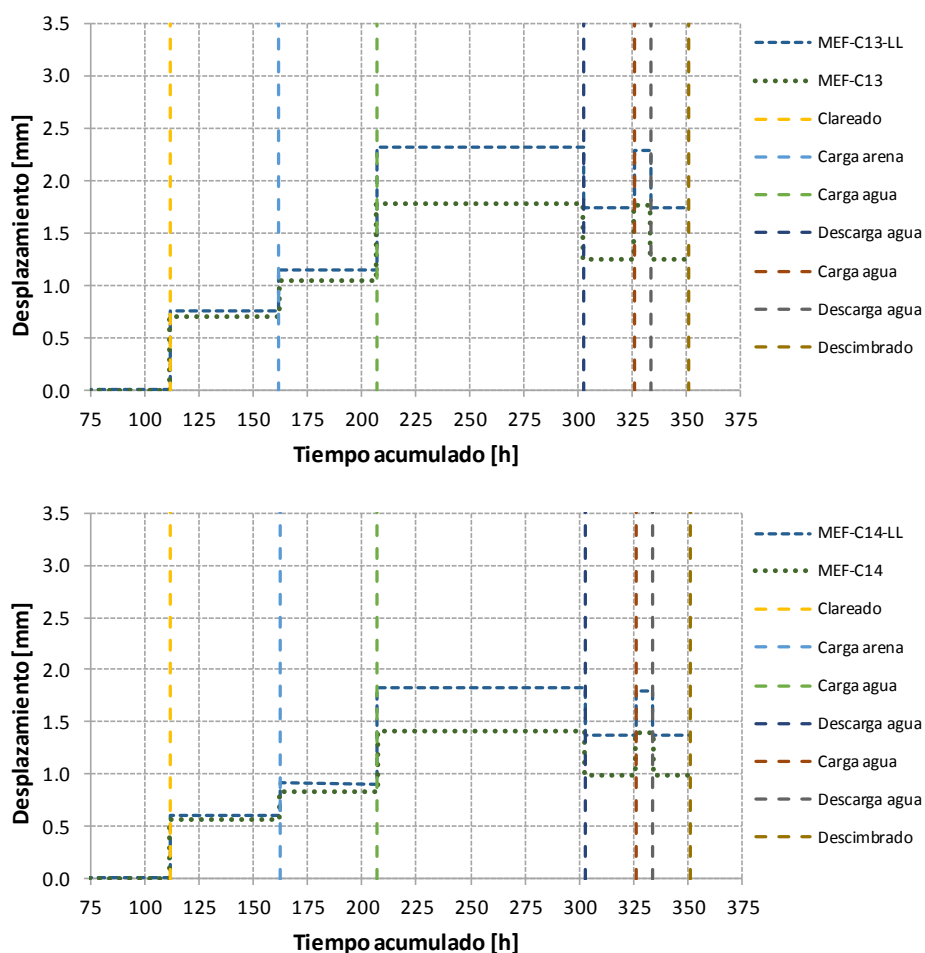
A2.3.2. Desplazamiento en pértigas









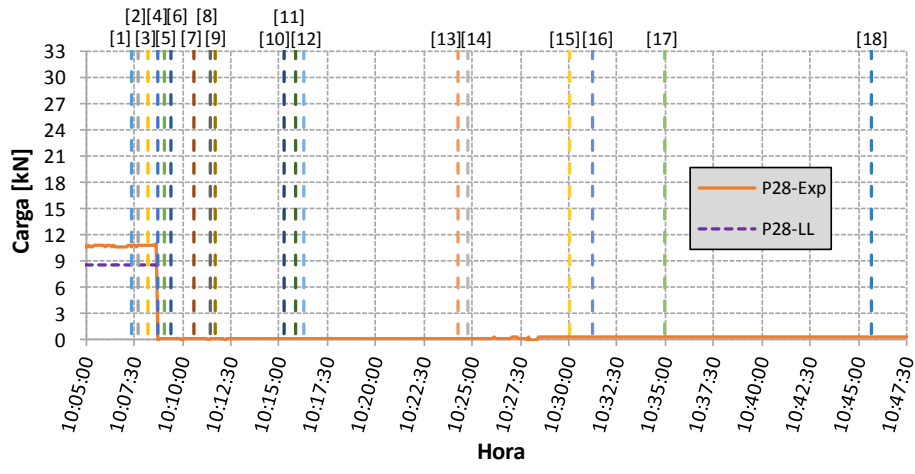
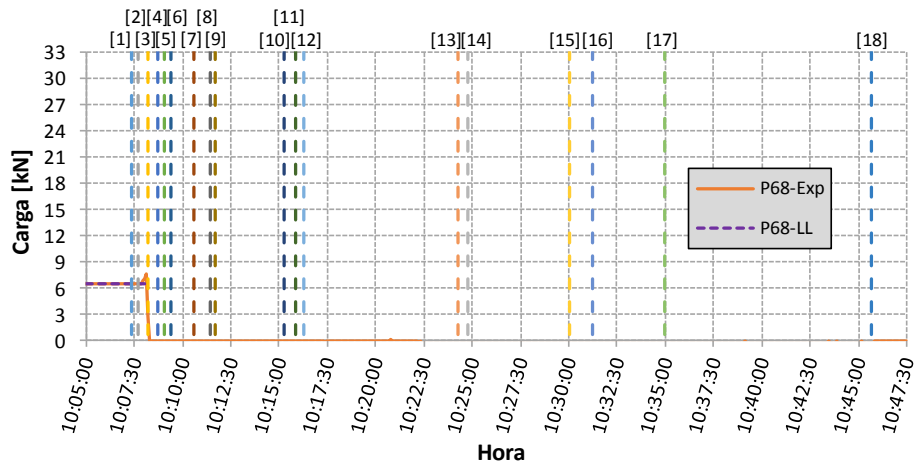
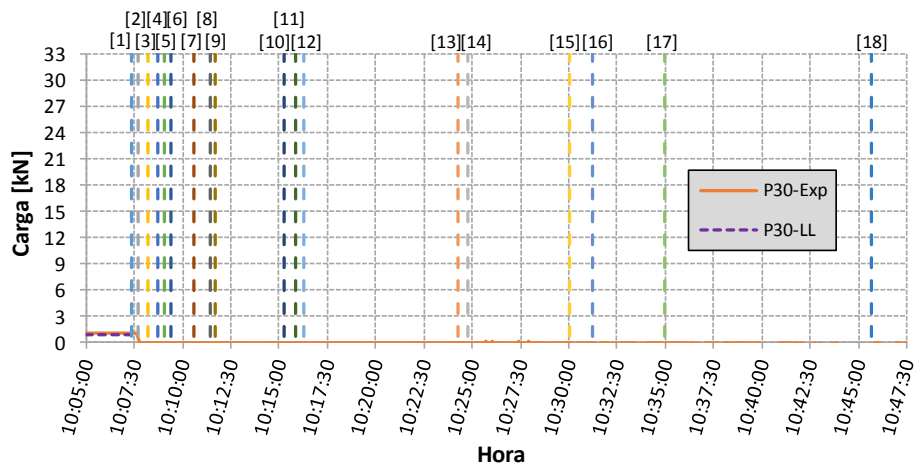


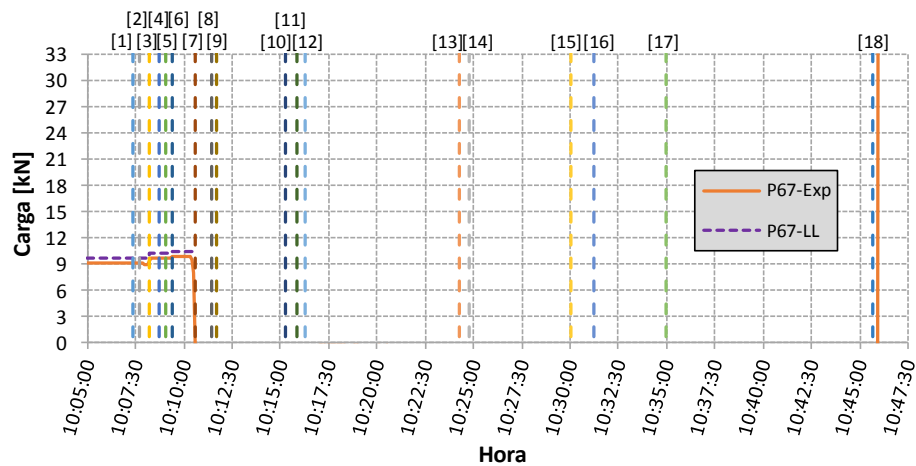
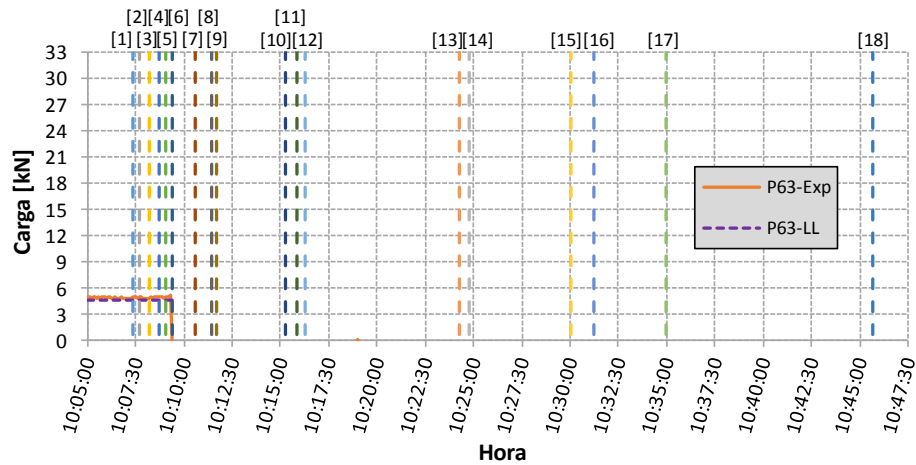
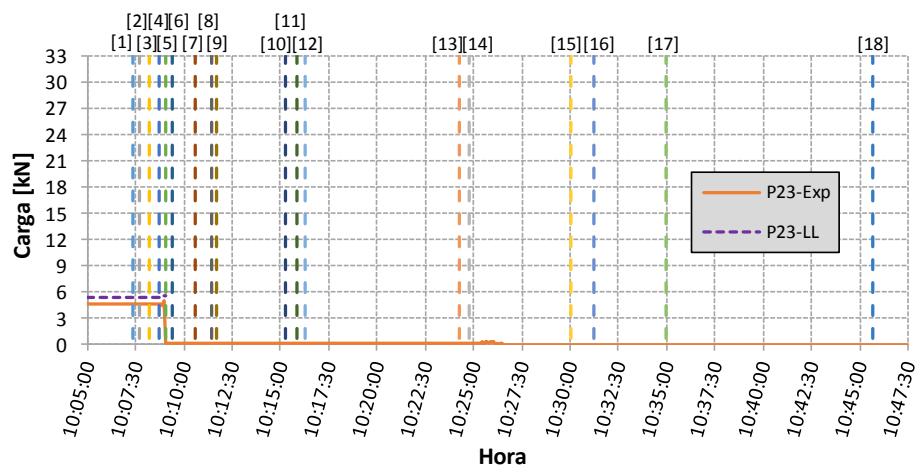
A2.4. Resultados del estudio del efecto positivo del limitador de carga durante el descimbrado

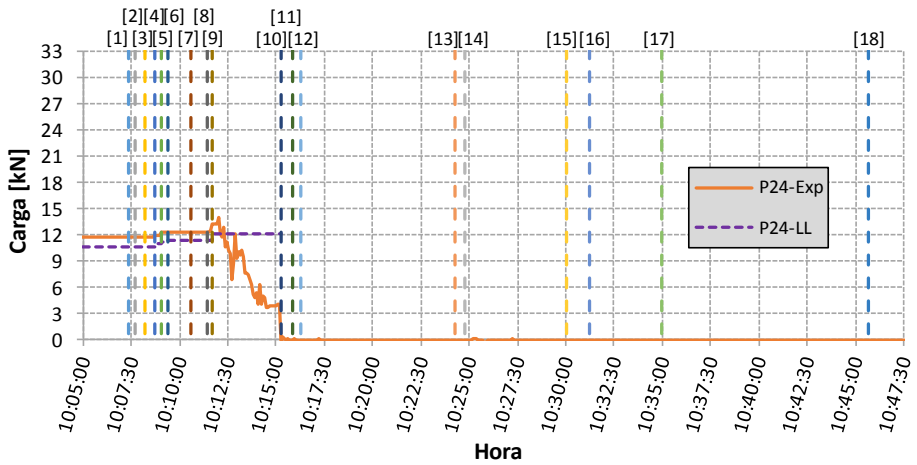
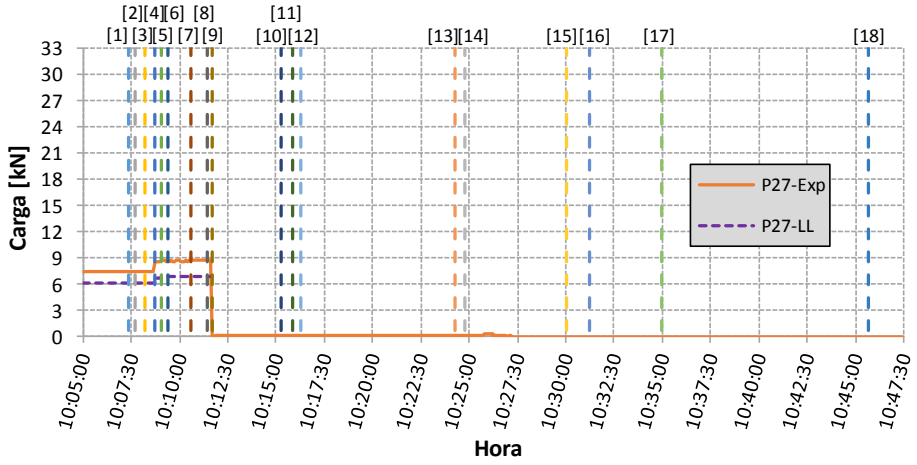
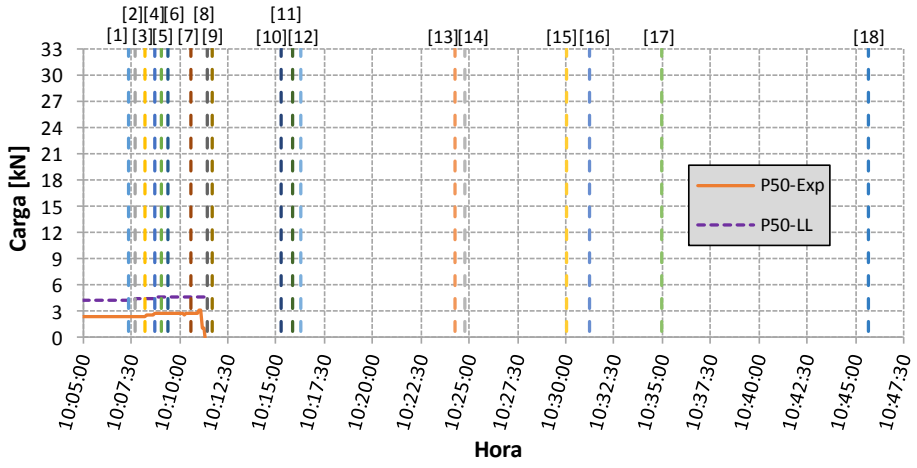
En este apartado se presentan todos los resultados obtenidos del análisis realizado del efecto positivo del limitado de carga durante el descimbrado. Como recordatorio, y dado que a lo largo del apartado se realizan referencias a la secuencia de descimbrado, en la Fig. A2.2 se presenta la secuencia de descimbrado adoptado durante la realización de la operación de descimbrado.

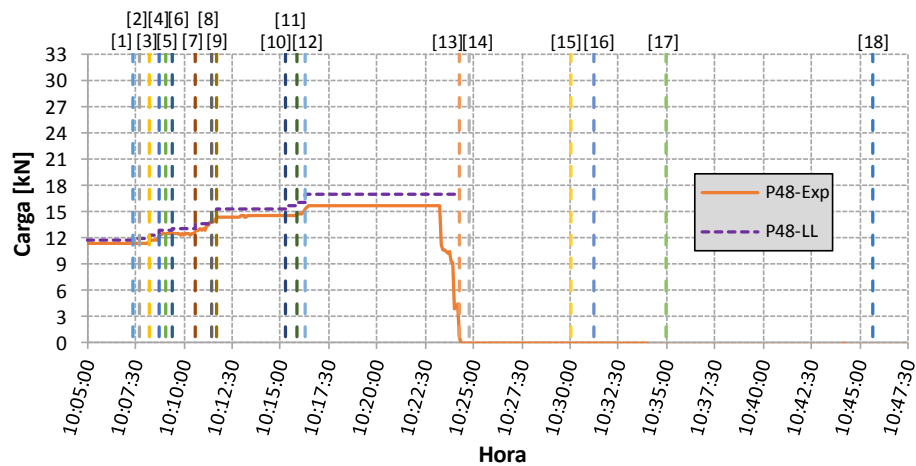
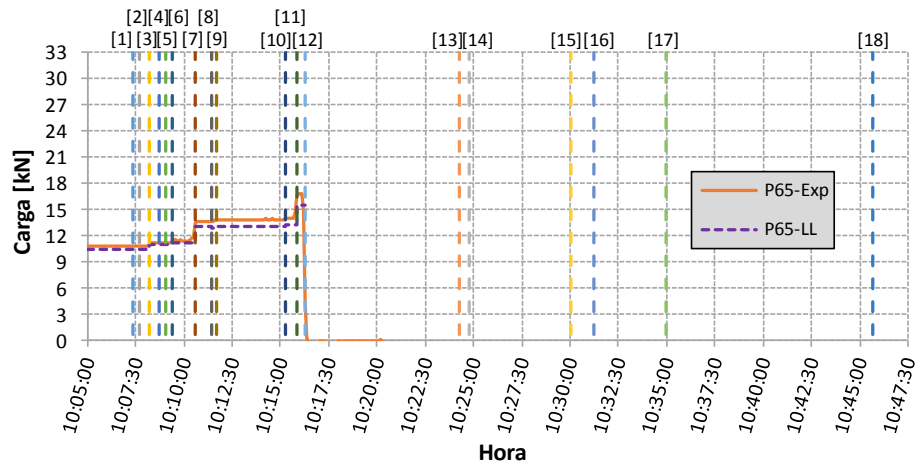
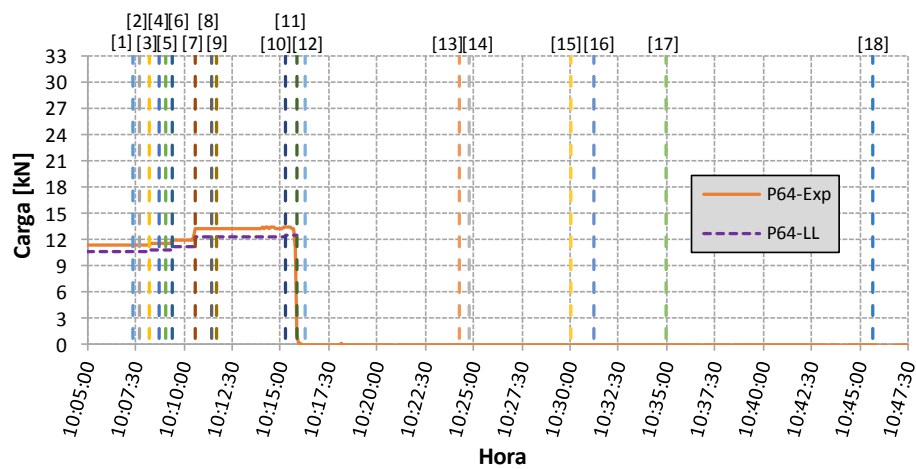
Los diferentes análisis realizados consisten en:

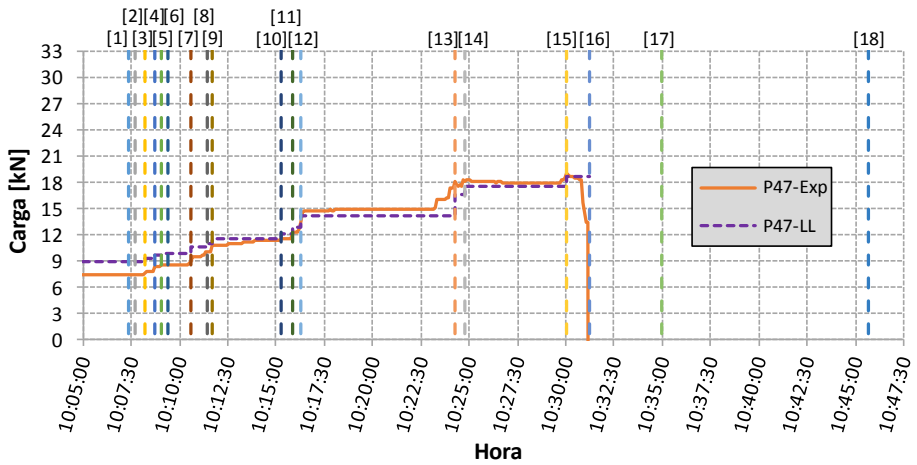
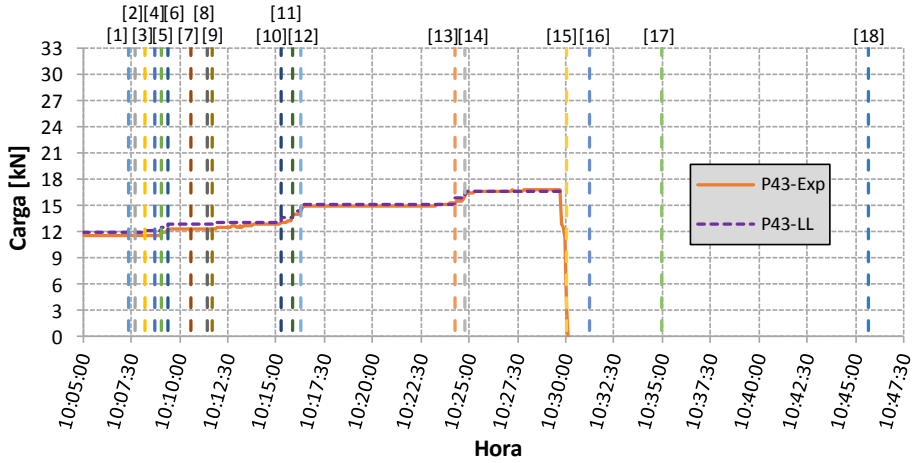
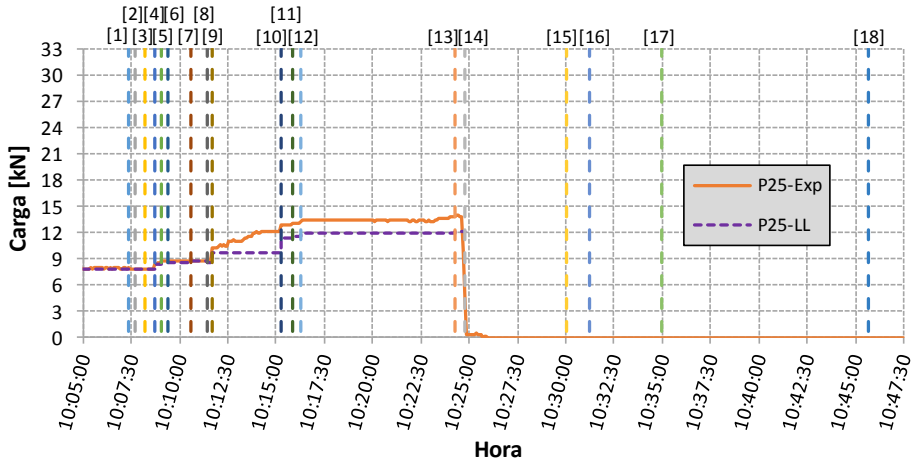
- La validación del modelo numérico durante del descimbrado.
- La comparación de la fase de descimbrado con y sin limitadores de carga según las mismas condiciones del ensayo experimental.

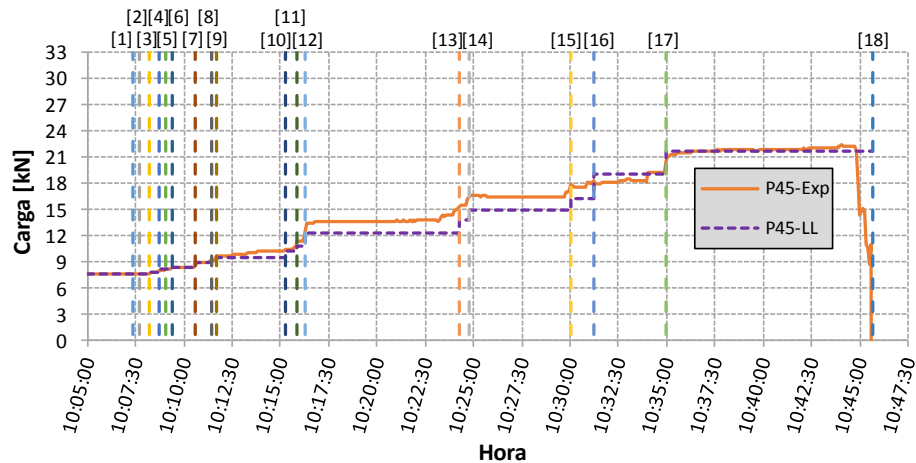
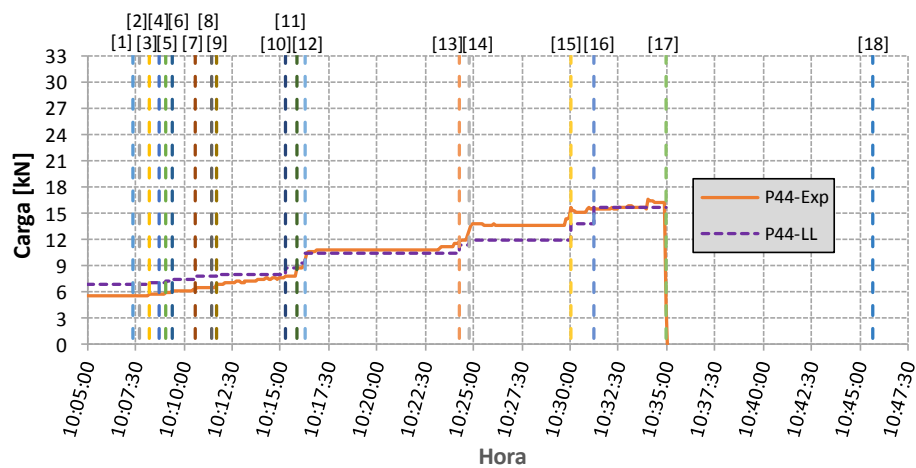




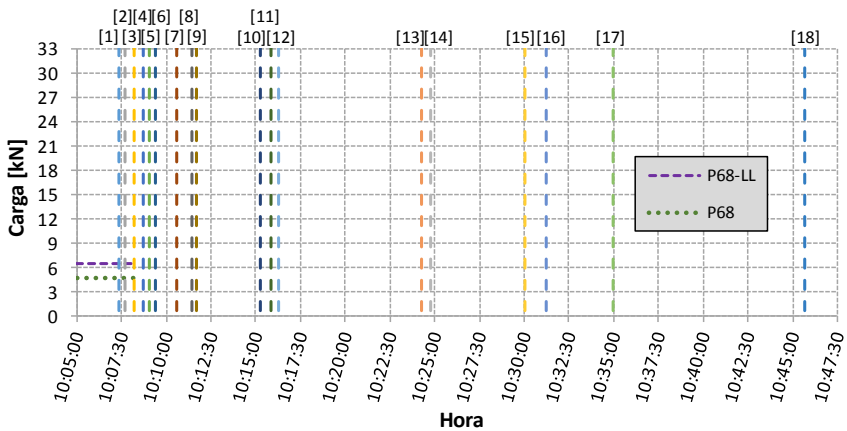
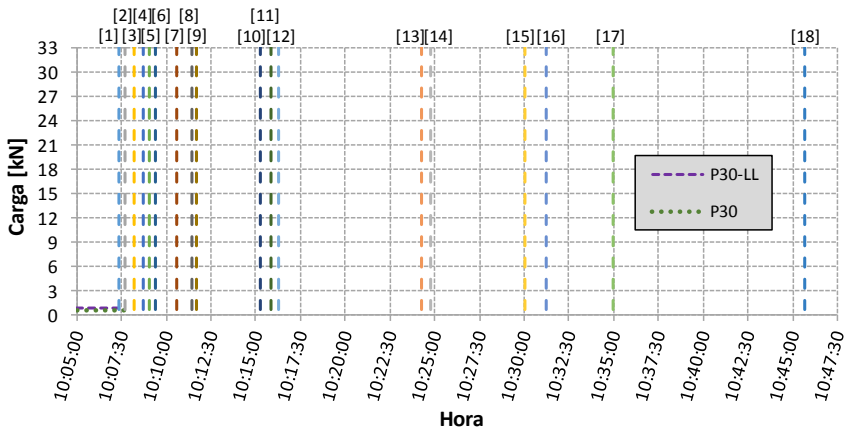
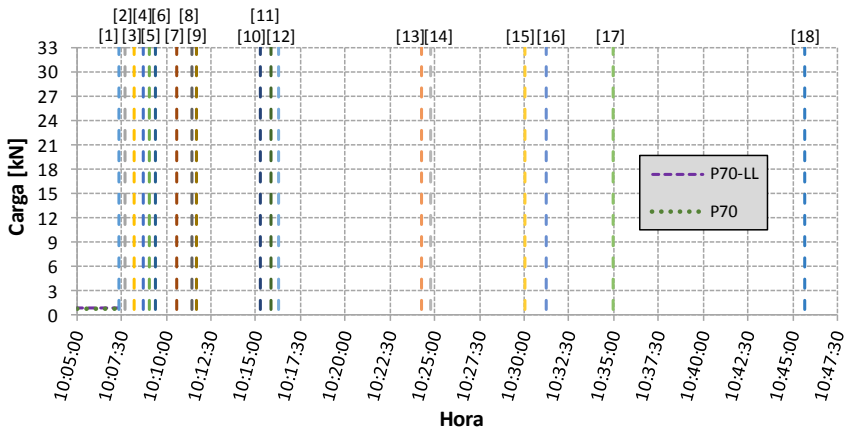


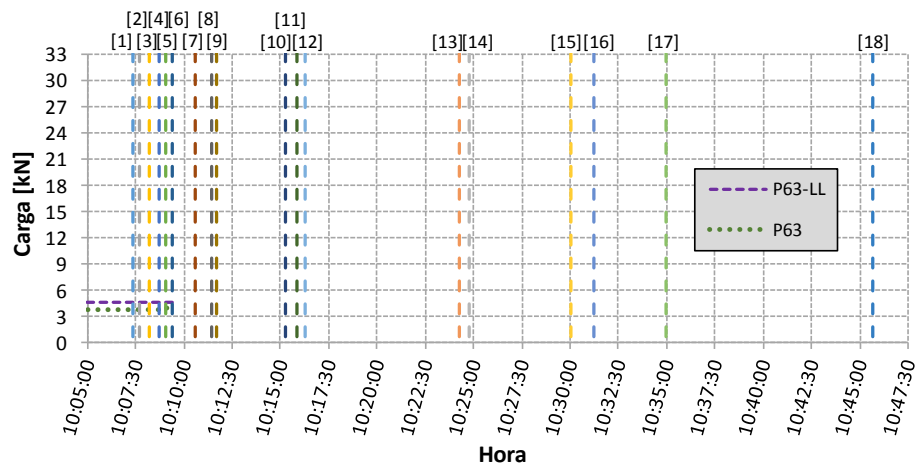
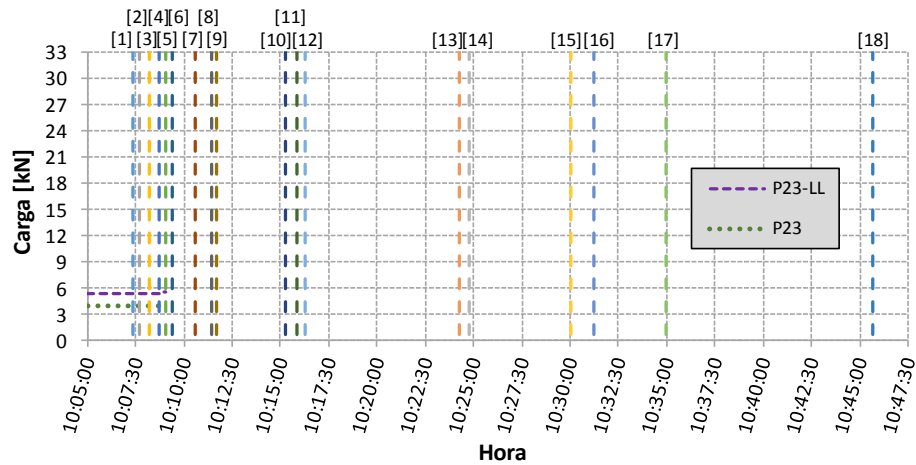
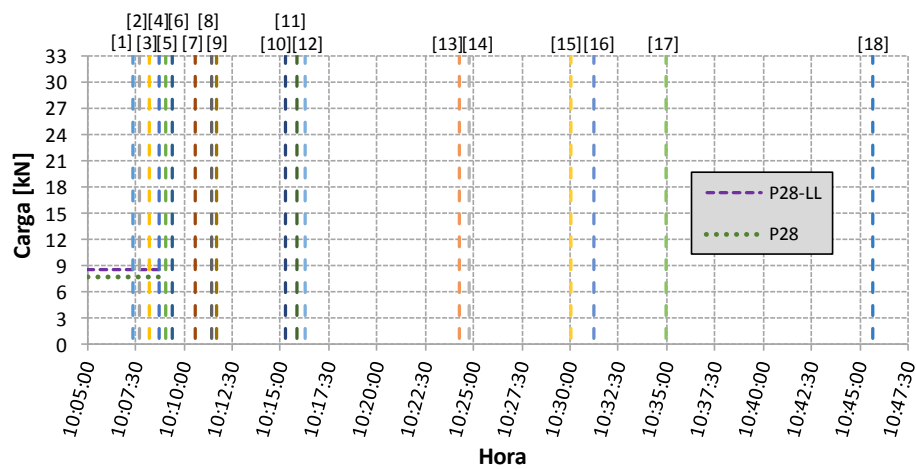


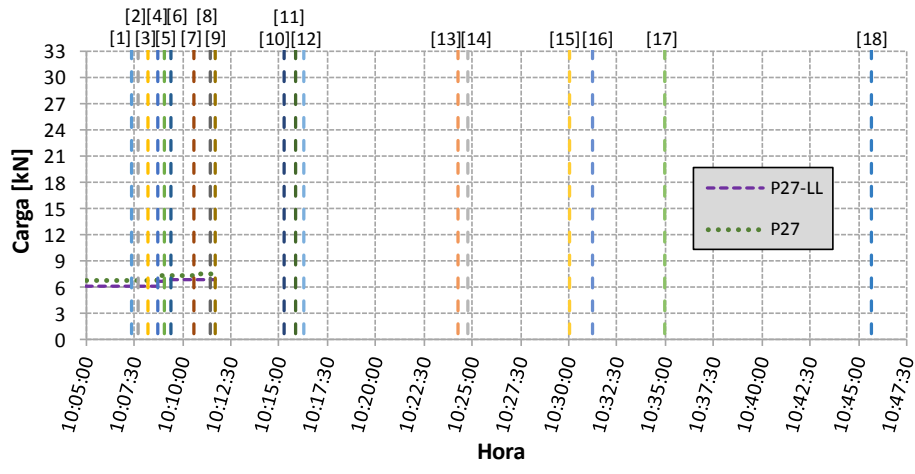
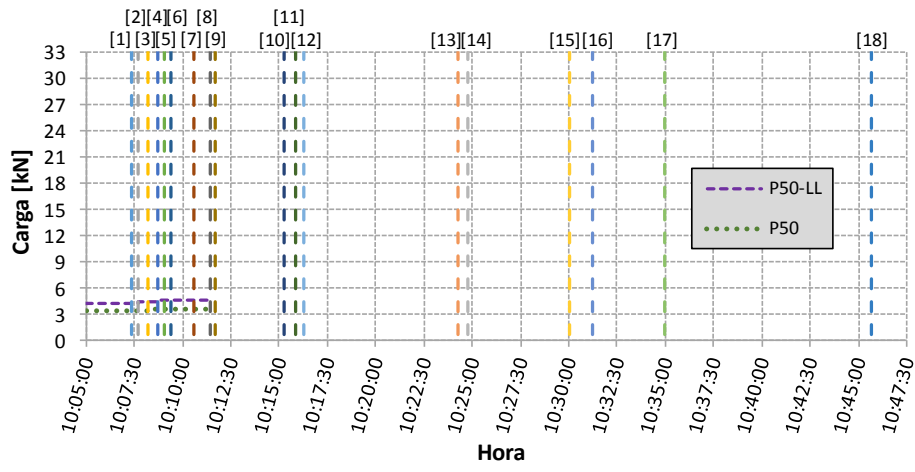
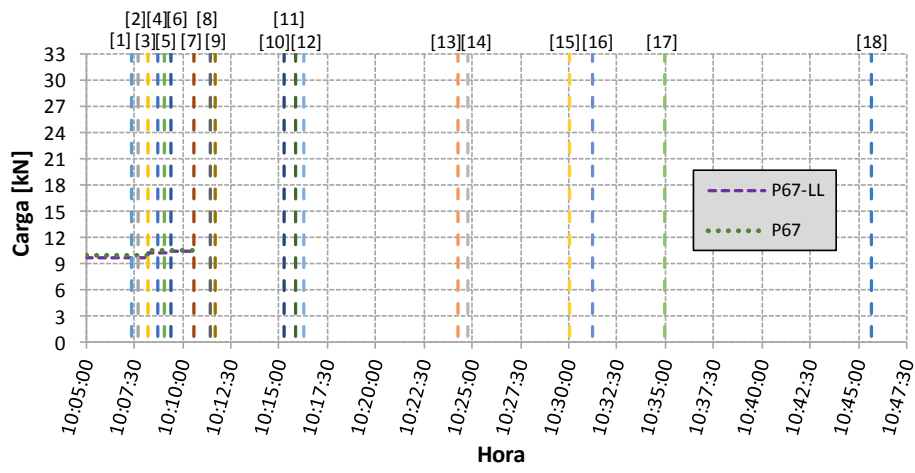


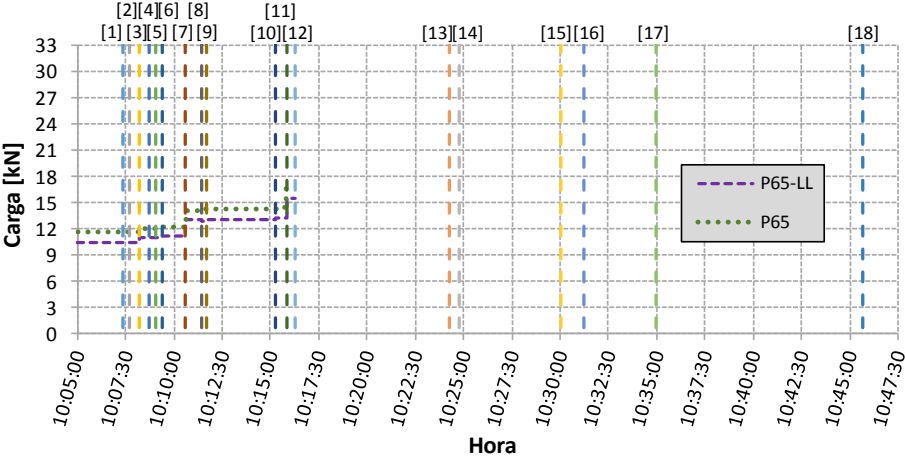
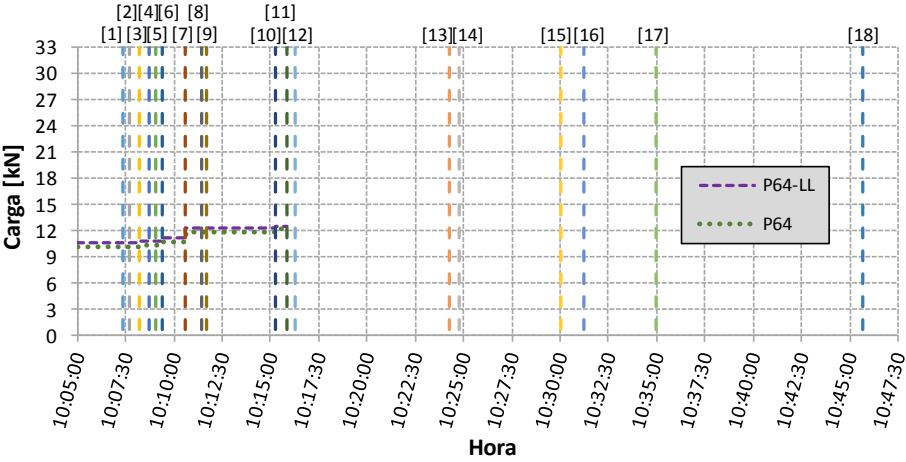
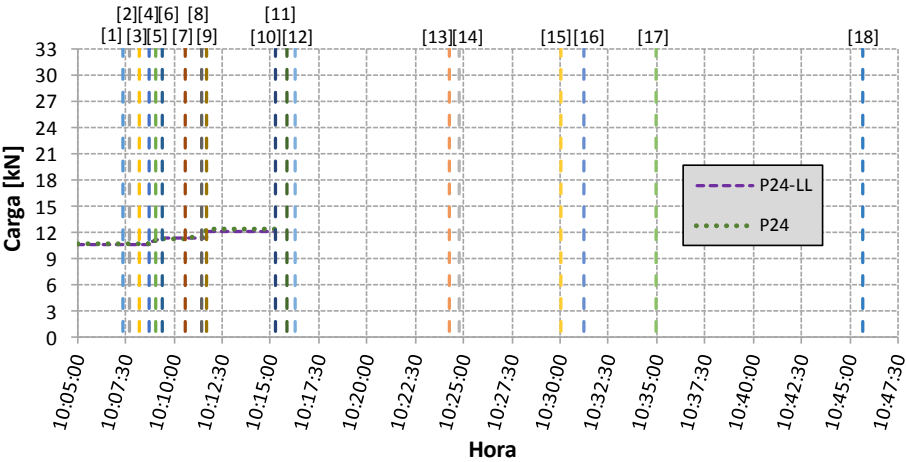


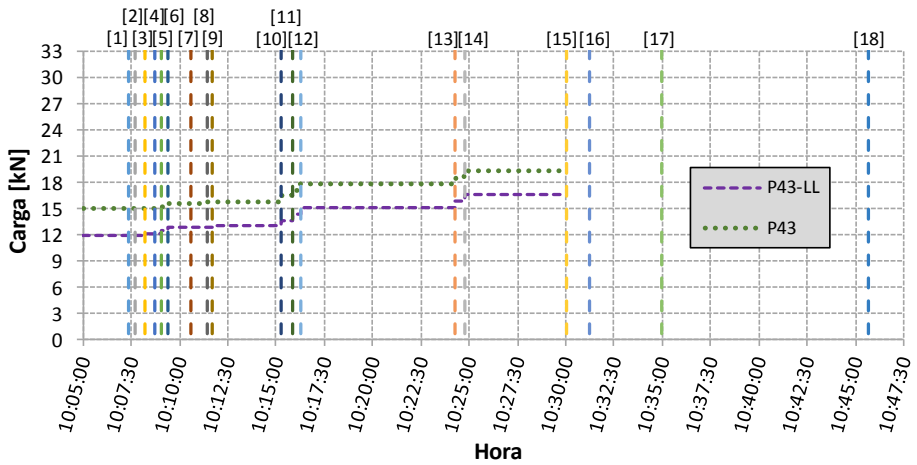
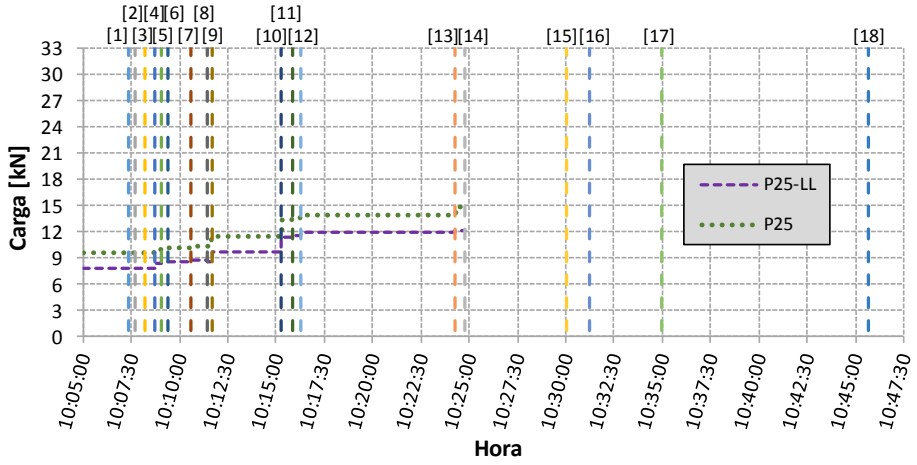
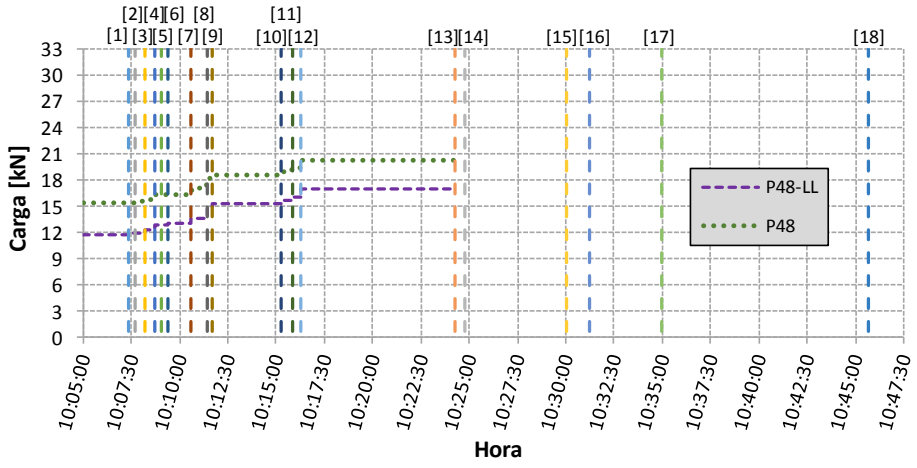
A2.4.2. Comparación de la fase de descimbrado con y sin limitadores de carga según las mismas condiciones del ensayo

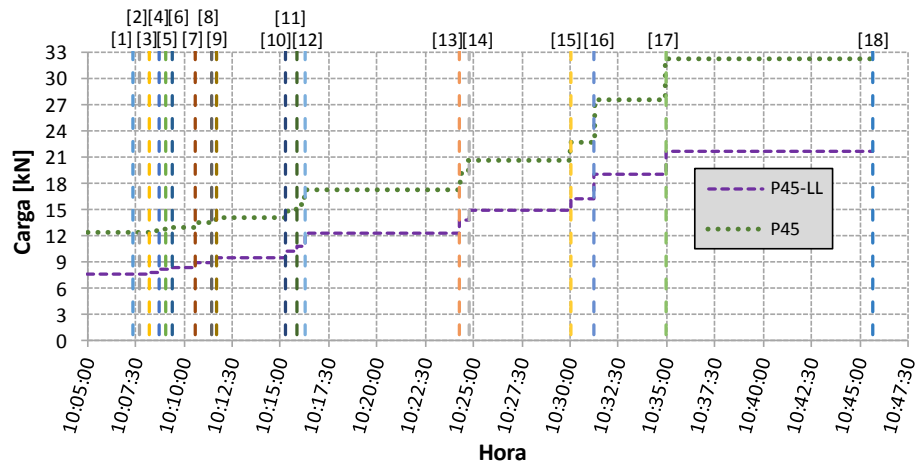
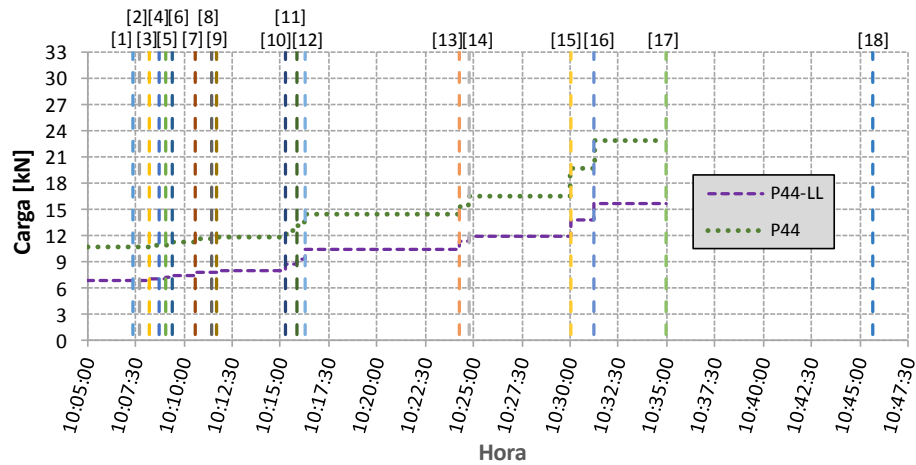
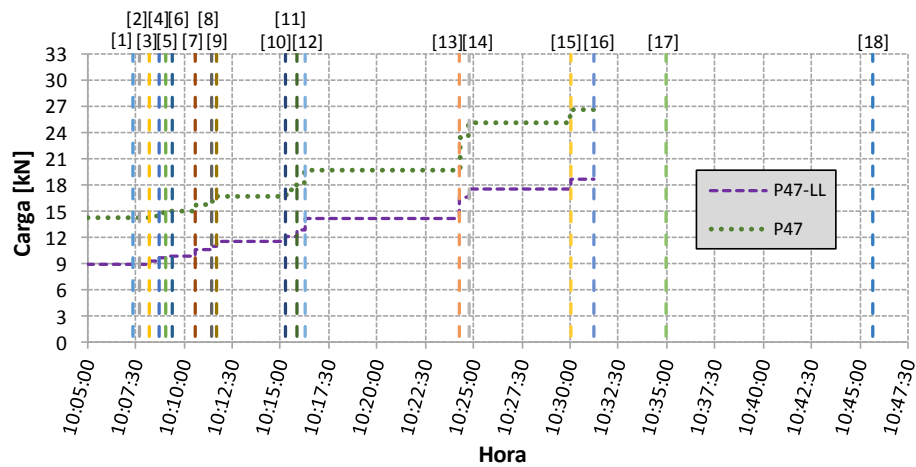




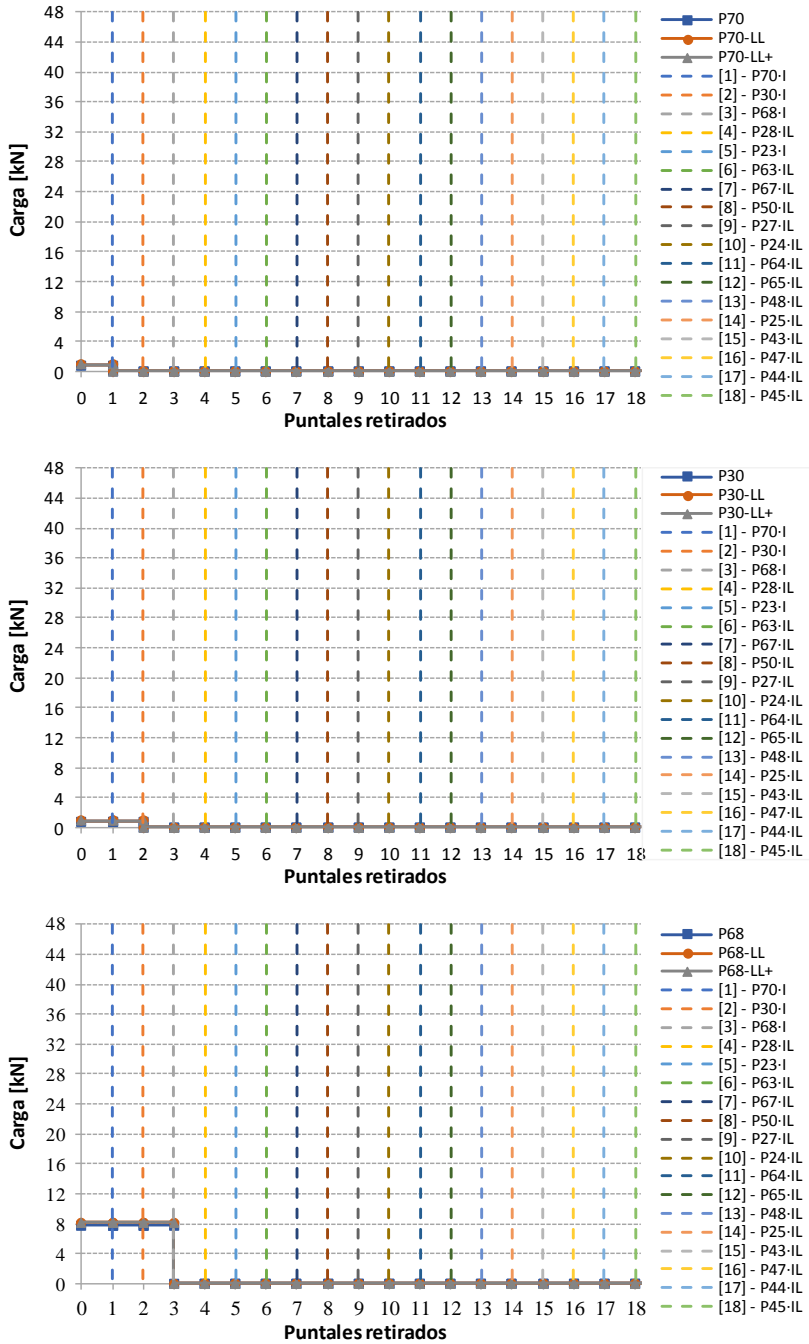


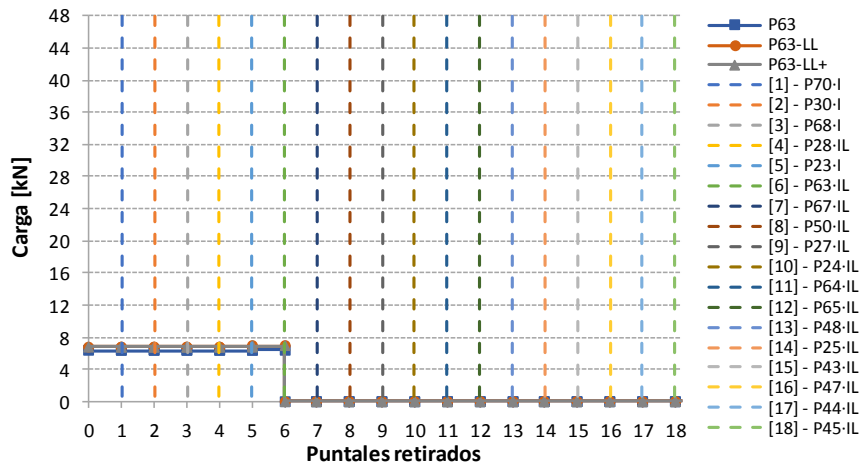
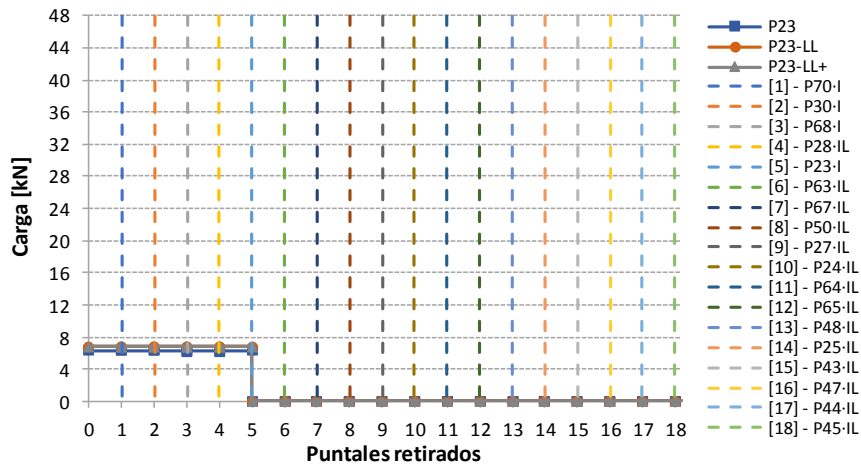
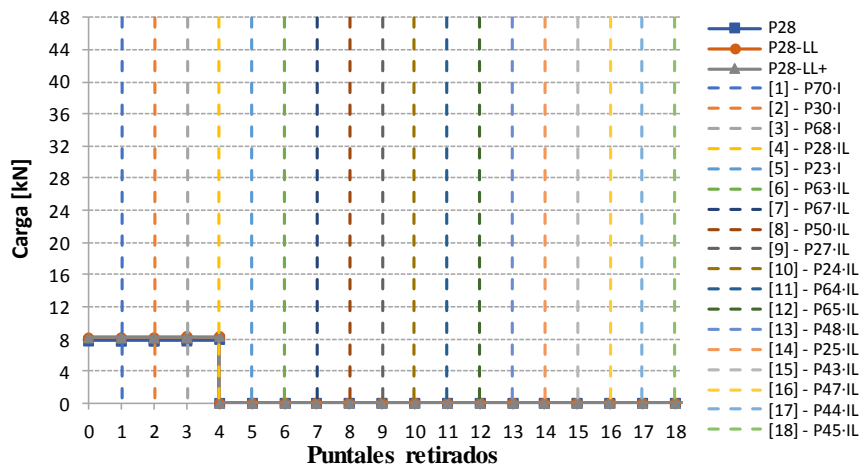


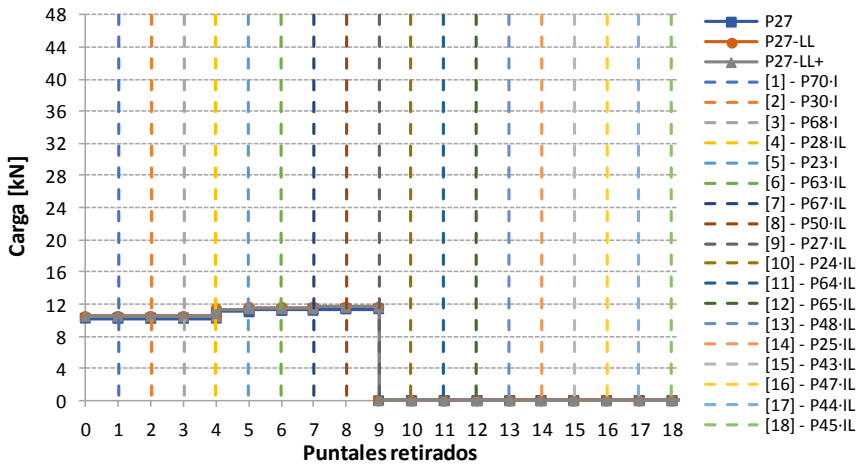
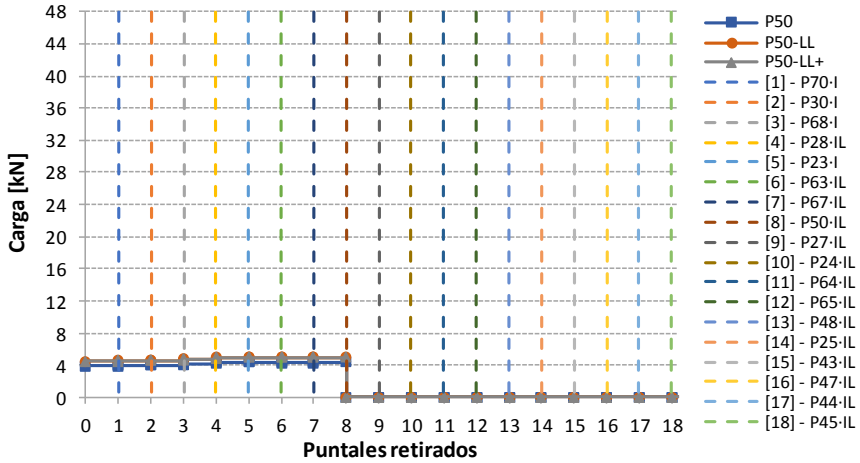
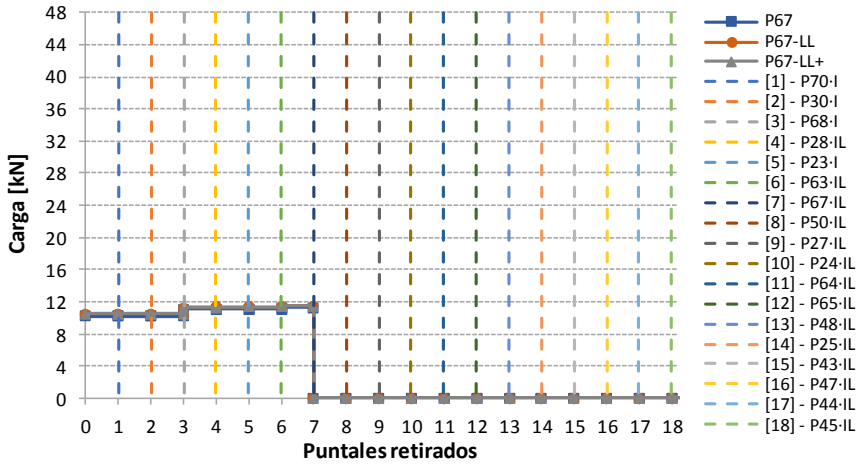


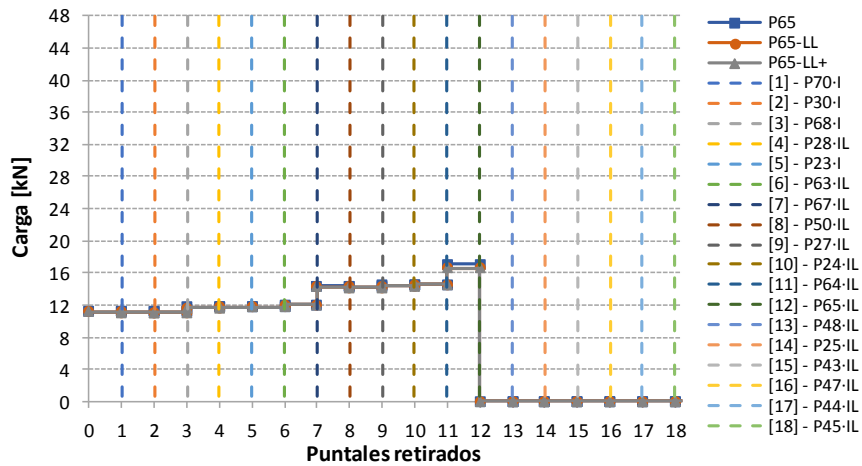
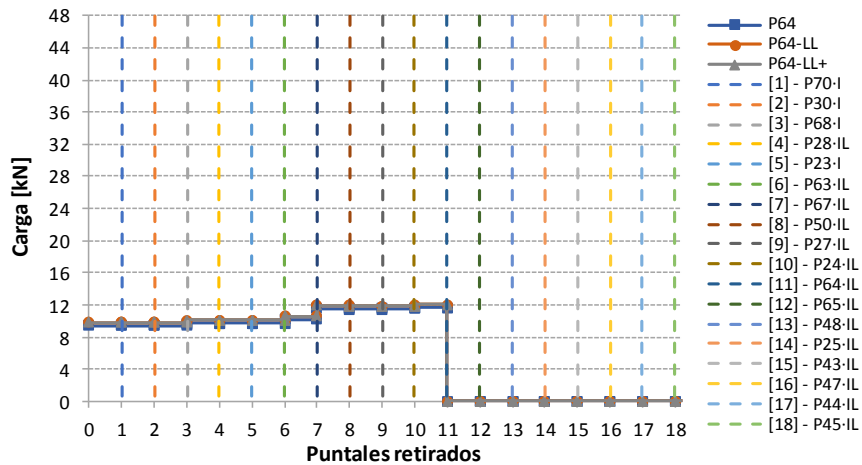
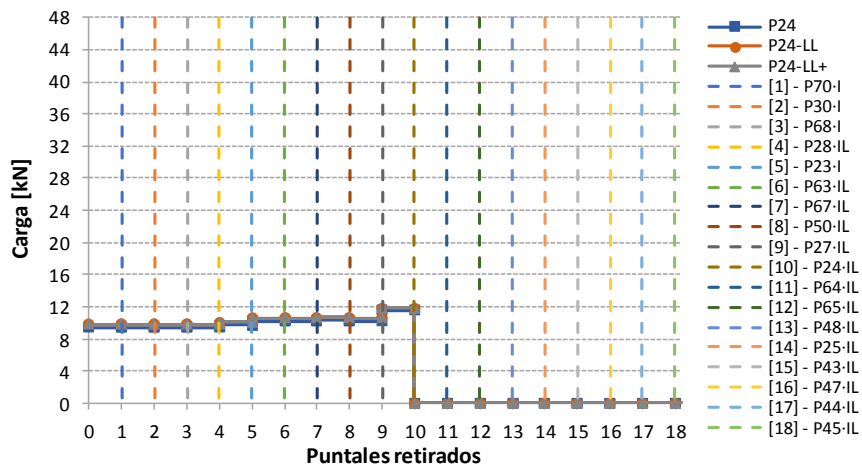


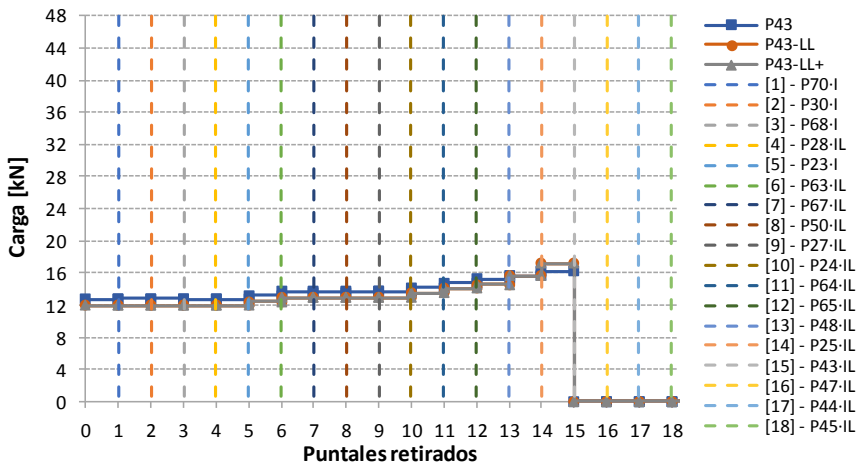
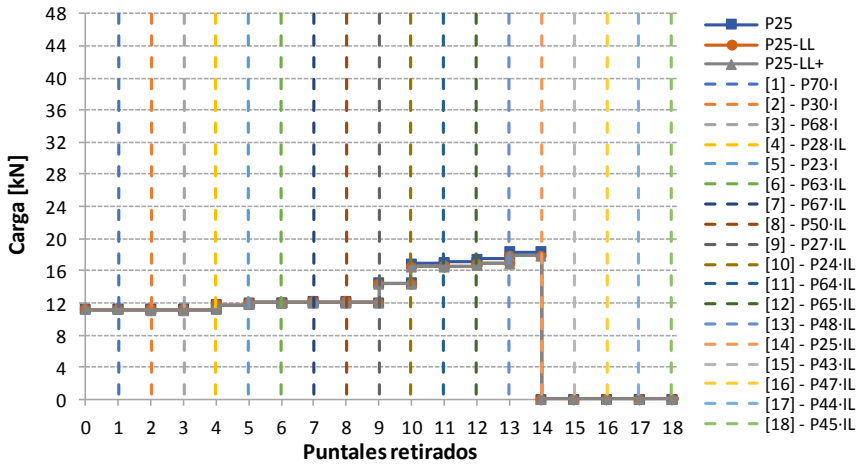
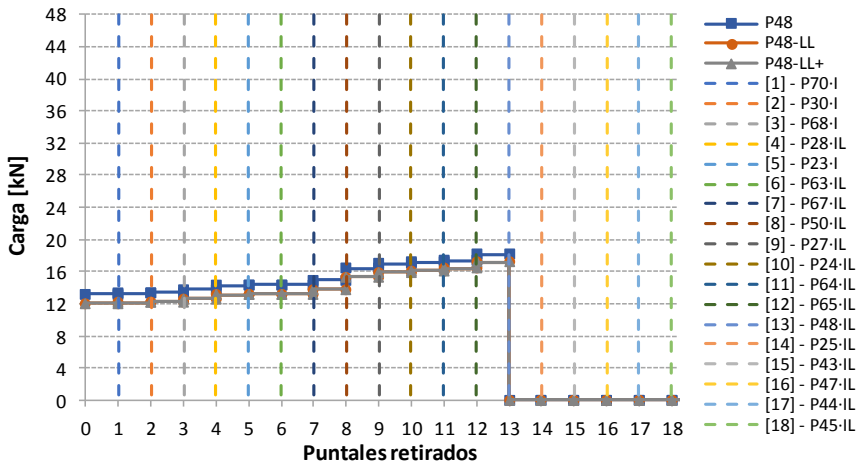
A2.4.3. Comparación de la fase de descimbrado con y sin limitadores de carga considerando puntales de igual rigidez

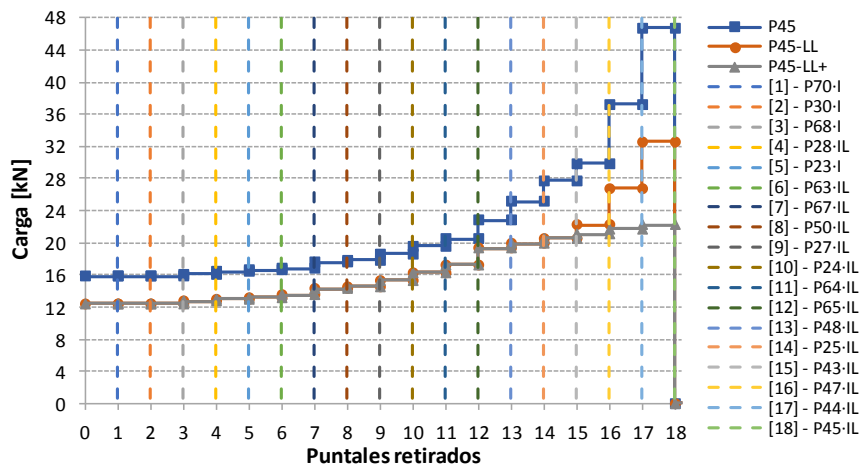
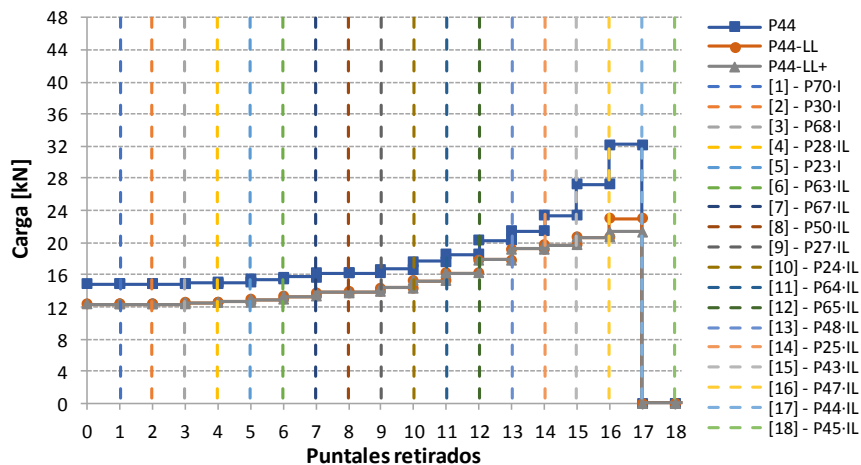
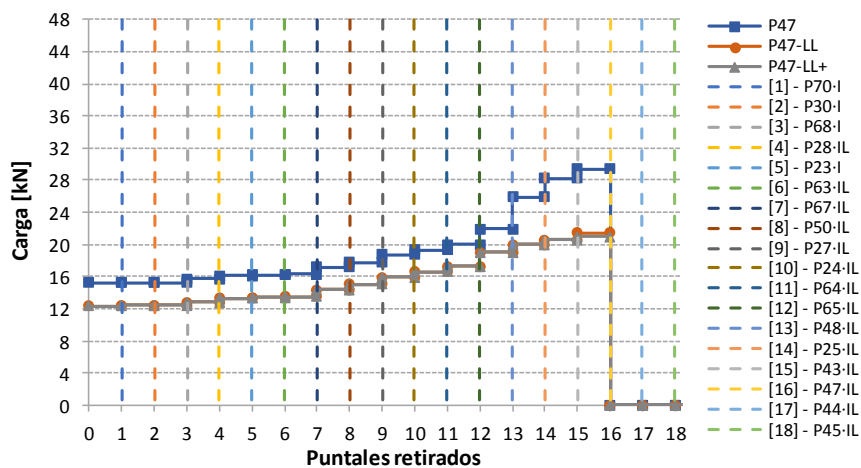












APÉNDICE 3. PUBLICACIONES DEL AUTOR RELACIONADAS CON LA TESIS

Las publicaciones del autor, relacionadas con la tesis doctoral, se enumeran a continuación, ordenadas por fecha de publicación:

- [1] Buitrago M. Influencia del empleo de elementos de control de carga en los puntales en la construcción de edificios de forjados consecutivos de hormigón in situ. Aplicación al edificio de la Facultad de Bellas Artes de la Universidad Politécnica de Valencia. Proyecto Final de Carrera. Universitat Politècnica de València, 2012. doi:<http://hdl.handle.net/10251/53627>.
- [2] Buitrago M. Desarrollo de una aplicación informática de apoyo al cálculo del proceso constructivo de cimbrado/descimbrado de edificios en altura hormigonados in situ. Optimización del proceso aplicando técnicas de optimización heurística. Tesis Final de Máster. Universitat Politècnica de València, 2014. doi:<http://hdl.handle.net/10251/47383>.
- [3] Buitrago M, Alvarado YA, Adam JM, Calderón PC, Gasch I, Moragues JJ. Improving construction processes of concrete building structures using load limiters on shores. *Eng Struct* 2015;100:104–115. doi:10.1016/j.engstruct.2015.06.007.
- [4] Adam JM, Buitrago M, Calderón PA. Discussion of “ Reliability-Based Load Requirements for Formwork Shores during Concrete Placement ” by Hao Zhang, James Reynolds, Kim J. R. Rasmussen, and Bruce R. Ellingwood. *J Struct Eng* 2016;142:1–1. doi:10.1061/(ASCE)ST.1943.541X.0001362.
- [5] Buitrago M, Adam JM, Calderón PA, Moragues JJ. Automatic design of building construction processes by simulated annealing. A measure to improve sustainability, time, financial and computational costs. *Proc. Second Int. Conf. Concr. Sustain. (ICCS 16)*, Madrid: 2016, p. 191–202.
- [6] Buitrago M, Adam JM, Alvarado YA, Moragues JJ, Gasch I, Calderón PA. Designing construction processes in buildings by heuristic optimization. *Eng Struct* 2016;111:1–10. doi:10.1016/j.engstruct.2015.12.009.
- [7] Buitrago M, Adam JM, Alvarado YA, Calderón PA, Gasch I. Maximum loads on shores during the construction of buildings. *Proc Inst Civ Eng - Struct Build* 2016;169:538–545. doi:10.1680/jstbu.15.00089.

- [8] Buitrago M, Adam JM, Calderón PA, Alvarado YA, Moragues JJ. Estimating loads on shores during the construction of RC building structures. *Struct Concr* 2016;17:502–512. doi:10.1002/suco.201500130.
- [9] Buitrago M, Adam JM, Calderón PA, Moragues JJ. Modelling of RC structures during construction. In: Barros H, Ferreira C, Adam JM, Delatte N, editors. 2nd Int. Conf. Recent Adv. Nonlinear Model. – Des. Rehabil. Struct., Coimbra: 2017, p. 53–62.
- [10] Adam JM, Buitrago M, Moragues JJ, Calderón PA. Limitations of Grundy & Kabaila’s simplified method and its repercussion on the safety and serviceability of successively shored building structures. *J Perform Constr Facil* 2017;31:1–10. doi:10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001038.
- [11] Buitrago M, Adam JM, Moragues JJ, Calderón PA, Alvarado YA. Simulación numérica de la construcción de estructuras de edificios de hormigón armado. *Congr. Métodos Numéricos en Ing., Valencia (Spain): SEMNI; 2017.*
- [12] Buitrago M, Adam JM, Calderón PA, Moragues JJ. On the use of experimental testing in RC building structures under construction. In: Pellicer E, Adam JM, Yepes V, Singh A, Yazdani S, editors. *Proc. Ninth Int. Struct. Eng. Constr. Conf., Valencia (Spain): ISEC press; 2017.*
- [13] Buitrago M, Moragues JJ, Calderón PA, Adam JM. Structural failures in cast-in-place RC building structures under construction. In: Makhoulf ASH, Aliofkhazraei M, editors. *Handb. Mater. Fail. Anal. with Case Stud. from Constr. Ind.* 1st ed, Butterworth-Heinemann, Elsevier; 2018. doi:10.1016/B978-0-08-101928-3.00008-2.
- [14] Buitrago M, Sagaseta J, Adam JM. Effects of sudden failure of shoring elements in concrete building structures under construction. *Eng Struct* 2018;172:508–522. doi:10.1016/j.engstruct.2018.06.052.
- [15] Buitrago M, Adam JM, Calderón PA, Moragues JJ. Load limiters on shores: Design and experimental research. *Eng Struct* 2018.
- [16] Buitrago M, Adam JM, Moragues JJ, Calderón PA. Load transmission between slabs and shores during the construction of RC building structures - A review. *Eng Struct* 2018.

Del trabajo recopilado en este documento de tesis doctoral se espera la publicación de otros 4 artículos más en revistas indexadas de elevado impacto, así como la publicación de entre 4 y 6 artículos de congreso de ámbito internacional. Se prevé el siguiente contenido para los diferentes artículos propuestos:

- Difusión del ensayo experimental llevado a cabo con el uso de limitadores de carga en puntales, junto con el estudio de la operación de descimbrado.

- Difusión del estudio llevado a cabo sobre las excentricidades de la carga registradas en puntales (momentos) durante el ensayo junto con el efecto del limitador de carga.
- Difusión del estudio numérico realizado con y sin el uso de limitadores de carga en puntales.
- Difusión del efecto positivo del limitador de carga frente al colapso progresivo de las estructuras de edificios durante su construcción.

